

Universidad Carlos III de Madrid

Escuela Politécnica Superior



Impresión 3D aplicada a la optomecánica

Trabajo Fin de Grado

Grado en Ingeniería Mecánica

Autor: Manuel Naranjo Robledo

Tutora: Marta Ruiz Llata

Junio 2015

Universidad Carlos III de Madrid

Escuela Politécnica Superior

Impresión 3D aplicada a la optomecánica

Trabajo Fin de Grado - Grado en Ingeniería Mecánica

Junio 2015

Autor: Manuel Naranjo Robledo

Tutora: Marta Ruiz Llata

1. Introducción.....	9
2. Estado del arte.....	10
2.1. La impresión 3D.....	10
2.1.1. Definición.....	10
2.1.2. Impresoras 3D.....	11
2.1.3. Tipos de tecnología de impresión 3D.....	11
2.1.4. ¿Cómo funciona una impresora 3D?.....	13
2.1.5. El proceso de impresión 3D.....	14
2.1.6. Materiales.....	17
2.1.6.1. <i>Materiales principales: Termoplásticos.....</i>	<i>18</i>
2.1.6.2. <i>Comparativa: ABS vs PLA.....</i>	<i>20</i>
2.1. 6.3. <i>Otros plásticos y materiales compuestos.....</i>	<i>21</i>
2.1.7. El proyecto RepRap.....	26
2.1.8. El futuro de la impresión 3D.....	28
2.2. Optomecánica.....	30
3. Marco regulador: Aspectos legales.....	31
3.1. Propiedad intelectual.....	31
3.2. Propiedad industrial.....	32
3.3. Derecho de imagen	33
3.4. Otros ámbitos jurídicos.....	34
4. Impresora 3D Power Code.....	36
4.1. Características.....	37
4.2. Partes y componentes.....	37
4.2.1. Estructura mecánica.....	37
4.2.2. Componentes electrónicos.....	39
4.3. Conexiones.....	46
4.4. Calibración mecánica.....	47
5. Firmware	49
5.1. Marlin.....	49

6. Software	50
6.1. Solid Edge	50
6.2. Cura.....	50
6.2.1. Área de impresión.....	51
6.2.2. Parámetros de configuración.....	53
6.3. Pronterface.....	65
7. Diseño e impresión 3D de componentes optomecánicos	68
7.1. Diseño 1: Sistema óptico receptor.....	70
7.1.1. Definición del problema	71
7.1.2. Solución adoptada	72
7.1.3. Conclusiones.....	77
7.2. Diseño 2: Par emisor - receptor.....	79
7.2.1. Definición del problema	80
7.2.2. Solución adoptada	80
7.2.3. Conclusiones.....	85
7.3. Diseño 2: Unión de postes con ángulo variable	87
7.3.1. Definición del problema.....	87
7.3.2. Solución adoptada.....	88
7.3.3. Conclusiones.....	95
8. Conclusiones generales	98
9. Bibliografía y referencias.....	100
9.1. Referencias.....	100
9.2. Bibliografía	101
10. Anexos	104
ANEXO I: Presupuesto.....	104
ANEXO II: Configuración del firmware Marlin	106
ANEXO III: Planos.....	112

Índice de ilustraciones

1. Funcionamiento de FFF.....	14
2. Diseño 3D con el programa Solid Edge	15
3. Escáner 3D portátil HandyScan 700 de Creaform (izq.) y Ciclop de BQ(dcha.) ...	15
4. Ejemplo de lenguaje de programación CNC	16
5. Puerto SD en la pantalla LCD de la Power Code.....	17
6. Impresión 3D con grafeno	17
7. Piezas de ABS de la Power Code(izquierda) y recipiente de ABS (derecha)	19
8. Tornillo y tuerca de PLA (izquierda) y pieza de Soft PLA (derecha)	19
9. Fabricación con PVA	21
10. Herramienta de PC.....	22
11. Envase de HDPE	22
12. Pieza de Nylon.....	23
13. Objetos impresos con Laybrick	23
14. Búho de Laywoo-D3	24
15. Envase de T-glase	25
16. Zapatillas de Filaflex (izquierda) y piezas de Ninjaflex (derecha)	25
17. Impresora 3D Spectrum Z510.....	26
18. Impresora 3D Darwin (izquierda) y Prusa i3 (derecha)	27
19. Impresora 3D Power Code.....	36
20. Arduino Mega 2560.....	40
21. Ramps 1.4.	40
22. Motor Nema 17.....	41
23. Drivers de los motores	41
24. Final de carrera de 3 pines.....	42
25. Termistor NTC de 100 k.....	42
26. Cama caliente MK2B Dual Power	43
27. Fuente de alimentación 600 W	44
28. Preparación de la fuente de alimentación.....	44
29. HotEnd E3D V6.....	45
30. Pantalla LCD.....	45
31. Conexiones a Ramps 1.4.	46
32. Final de carrera eje Z (izquierda) y tornillo tope (derecha)	48
33. Entornos de Solid Edge.....	49
34. Interfaz del programa Cura.....	51
35. Botón "Load"	51
36. Botón "Print with USB"	51

37. Botón "Share on YouMagine"	52
38. Opciones de visualización (View Mode)	52
39. Opciones de transformación	52
40. Tiempo de impresión, gasto de material y coste	53
41. Pestaña Basic.....	53
42. Pestaña Advanced.....	56
43. Pestaña Plugins.....	58
44. Pestaña Start/End-GCode.....	58
45. Pestaña File	59
46. Pestaña Tools.....	60
47. Pestaña Machine.....	60
48. Pestaña Expert.....	61
49. Interfaz de Pronterface.....	65
50. Esquema de tubo de lente.....	70
51. Tubo de lente SM1L20 de Thorlabs.....	71
52. Distancia focal óptima.....	72
53. Diseño 3D del tubo	73
54. Diseño 3D de la tapa superior.....	73
55. Diseño 3D de la tapa inferior	74
56. Vista del conjunto explosionado (izquierda) y con corte a 1/4 (derecha)	74
57. Configuración del soporte del tubo.....	76
58. De izquierda a derecha: tapa superior, tubo y tapa inferior.....	77
59. Diseño 1 montado.....	77
60. Par emisor - receptor.....	80
61. Diseño 3D de la plataforma	81
62. Diseño 3D de la sujeción.....	81
63. Diseño 3D del brazo.....	82
64. Diseño 3D de la Montura Tipo A	82
65. Diseño 3D de la Montura Tipo B	82
66. Diseño 3D del conjunto 2 (izq.) y vista explosionada (dcha.)	83
67. Piezas del Diseño 2.....	84
68. Unión entre el brazo y la Montura Tipo A	84
69. Diseño 2 montado	85
70. Ensayo	85
71. Modelo SWC de Thorlabs (izq.) y CA-2 de Newport (dcha.)	88
72. Diseño 3D de la abrazadera fija.....	89
73. Diseño 3D del pasador	89
74. Diseño 3D de la abrazadera móvil.....	89
75. Diseño 3D del conjunto 3 (izq.) y vista explosionada (dcha.)	90

76. Configuración del soporte de la abrazadera fija.....	92
77. Abrazadera fija con soporte (izq.) y sin él (dcha.)	92
78. Unión de la abrazadera móvil al pasador	93
79. Tuerca M3 en la abrazadera.....	93
80. Ensayo de par de apriete con llave dinamométrica	94
81. Espacio entre pestañas de abrazadera.....	94
82. Diseño 3 montado.....	94
83. Conjunto 3 en varias posiciones.....	95
84. Posición de 90º	95

Índice de tablas

<i>Tabla 1. Comparativa ABS vs PLA.....</i>	<i>20</i>
<i>Tabla 2. Elementos de la estructura mecánica.....</i>	<i>38</i>
<i>Tabla 3. Componentes electrónicos.....</i>	<i>39</i>
<i>Tabla 4. Parámetros de impresión del Diseño 1.....</i>	<i>75</i>
<i>Tabla 5. Configuración del soporte del tubo</i>	<i>75</i>
<i>Tabla 6. Parámetros de impresión del Diseño 1 alternativo.....</i>	<i>78</i>
<i>Tabla 7. Tiempos de fabricación del Diseño 1.....</i>	<i>78</i>
<i>Tabla 8. Gastos de material y costes del Diseño 1</i>	<i>79</i>
<i>Tabla 9. Parámetros de impresión del Diseño 2</i>	<i>83</i>
<i>Tabla 10. Tiempos de fabricación del Diseño 2</i>	<i>86</i>
<i>Tabla 11. Gastos de material y costes del Diseño 2</i>	<i>87</i>
<i>Tabla 12. Parámetros de impresión del Diseño 3</i>	<i>90</i>
<i>Tabla 13. Configuración del soporte de la abrazadera fija</i>	<i>91</i>
<i>Tabla 14. Tiempos de fabricación del Diseño 3</i>	<i>96</i>
<i>Tabla 15. Gastos de material y coste del Diseño 3</i>	<i>97</i>
<i>Tabla 16. Presupuesto de componentes impresos.....</i>	<i>104</i>
<i>Tabla 17. Inversión inicial</i>	<i>104</i>
<i>Tabla 18. Presupuesto de productos comerciales.....</i>	<i>104</i>

1. Introducción

El objetivo principal de este proyecto será el estudio de la impresión 3D y su aplicación en el ámbito de la optomecánica, utilizando para ello una impresora 3D Open Source de bajo coste.

El trabajo se ha desarrollado en el Departamento de Tecnología Electrónica, concretamente en el *Grupo de optoelectrónica y tecnología láser*.

La optomecánica es la fabricación y utilización de componentes y dispositivos ópticos para configurar un sistema óptico con el fin de realizar un ensayo. La finalidad de este proyecto surge de la problemática que presentan algunos modelos para realizar dichos ensayos. Para ello, y gracias a la versatilidad de la impresión 3D, se pueden realizar diseños personalizados para un ensayo concreto. La otra finalidad del proyecto será estudiar la viabilidad económica de objetos fabricados mediante impresión 3D para este ámbito.

La impresión 3D es un conjunto de tecnologías de fabricación de objetos tridimensionales, en el que la figura se va creando añadiendo material capa por capa hasta conseguir la pieza deseada en tres dimensiones.

La impresora utilizada, la Power Code, se ha montado íntegramente durante este trabajo, partiendo de todas las piezas y componentes de su kit automontable. También se ha realizado su calibración, configuración y pruebas de impresión.

Se explicará detalladamente la impresora utilizada, así como el firmware y software empleados, junto con la explicación de todos los parámetros de configuración e impresión que han formado parte del trabajo.

Además se propondrán varios diseños para su uso en la optomecánica, para posteriormente imprimirlos, evaluar sus características y su función en un sistema óptico y comparar cada caso con los productos comerciales similares del mercado, estudiando la viabilidad económica de la impresión 3D aplicada a la optomecánica.

2. Estado del arte

2.1. La impresión 3D

2.1.1. Definición

La impresión 3D es un conjunto de tecnologías de fabricación por adición de un objeto sólido tridimensional, creado mediante la superposición de capas sucesivas de material.

Se trata de crear un objeto real y en tres dimensiones a partir de un modelo diseñado por ordenador mediante un programa CAD, siglas provenientes del inglés "*Computer Aided Design*".

Contrariamente a lo que se cree, la impresión 3D no es una tecnología reciente, pues la primera máquina funcional fue creada en 1984 por Charles "Chuck" Hull, después de que se hubiera estado investigando con gran interés durante décadas. Hoy en día, esta tecnología es más relevante que nunca y se le están adjudicando propósitos antes impensados. No solo permite una producción rápida, de menor costo y con más detalle que otras tecnologías de fabricación, sino que hace posible la construcción de geometrías complejas que no están al alcance de otros métodos de producción tradicionales.

Es muy amplio el abanico de sectores para los que puede estar destinada la impresión 3D, con una versatilidad tal que va desde el sector industrial con prototipado, matricería o prefabricación de piezas, hasta el sector sanitario con prótesis médicas, recambios en automoción, calzado y ropa en industria textil, armas de fuego funcionales, envases en el sector alimenticio o maquetas (e incluso casas) en el ámbito de la arquitectura. Y por supuesto, en el ámbito doméstico.

Sin embargo, a pesar de que la creación de prototipos es su punto fuerte, la fabricación en masa es, en muchos casos, inviable, ya que la velocidad de impresión actualmente no puede competir con la rapidez de los métodos actuales para la fabricación en masa de grandes lotes, además de que las empresas de fabricación necesitarían una adaptación imposible de llevar a cabo.

A nivel de usuario directo de las impresoras 3D, nos permite crear nuestros propios objetos de forma sencilla y sin necesidad de utilizar herramientas complejas, con la ventaja de poder copiar y modificar dichos objetos fácilmente y sin esfuerzo. Destaca aquí no sólo el crear nuestras propias piezas, sino que también podemos sustituir, ya sea para reparar o mejorar, las piezas de productos comerciales, ya que en muchas ocasiones los repuestos suponen un coste alto o ni siquiera están a la venta. Por tanto, la impresión 3D hace frente y combate también a la obsolescencia programada.

2.1.2. Impresoras 3D

Una impresora 3D es una máquina capaz de fabricar objetos en tres dimensiones, partiendo de un modelo 3D diseñado por ordenador.

Se pueden clasificar en dos tipos, en función de la técnica utilizada en la impresión:

- De **compactación**: Consiste en la compactación por estratos de una masa de polvo para dar lugar a la pieza deseada. Las impresoras 3D de compactación se pueden clasificar en:
 - **Impresoras 3D de tinta**: El polvo se compacta utilizando una tinta aglomerante que puede ser de distintos colores. Dicho polvo puede ser de base de escayola o celulosa. La ventaja de este método es que es más rápido y económico, pero las piezas son más frágiles.
 - **Impresoras 3D láser**: El polvo se polimeriza mediante la energía transferido por un láser. Después de sumerge en un líquido que provoca que las zonas polimerizadas se solidifiquen. Al contrario que las de tinta, las piezas son más resistentes pero es un proceso más lento y costoso.
- Por **adición o inyección de polímeros**: La pieza es creada por la superposición de capas del propio polímero. A continuación se detallarán las tecnologías utilizadas en la fabricación aditiva, entre las que se encuentra la tecnología utilizada en impresoras 3D de bajo coste, como es la utilizada durante el proyecto.

2.1.3. Tecnologías de impresión 3D

La fabricación por adición o impresión 3D, es por definición, un proceso por el cual se crea un objeto tridimensional a partir de un modelo 3D mediante la unión de materiales, generalmente capa por capa, al contrario que las tecnologías sustractivas (como mecanizado o fresado) usadas en la fabricación tradicional.

Bajo esta definición, existen en el mercado siete tecnologías principales que pueden considerarse como impresión 3D o tecnologías de fabricación aditiva, y son las siguientes:

- **Fotopolimerización (VAT Photopolymerization)**:

Esta tecnología fue la primera de impresión 3D, patentada en 1986 por Charles Hull. Consiste en introducir una resina en una cuba que se endurece capa por capa

mediante un haz de luz de alta energía. Existen dos procesos que usan esta tecnología: el **SLA** (*Stereolithography*) o Estereolitografía, en el cual la resina es solidificada por un láser; y la **DLP** (*Digital Light Processing*) o Procesamiento de Luz Digital, que endurece la resina mediante un proyector de luz.

- **Inyección de metal** (*Material Jetting*):

Esta tecnología de impresión 3D utiliza un proceso llamado **MJM** (*Multi-Jet Modeling*) o Modelado de Chorro Múltiple. Mediante un cabezal de impresión de inyección (similar a las impresoras convencionales) se inyectan materiales de cera en una plataforma de impresión. El material se enfría y solidifica conforme la plataforma desciende, permitiendo la construcción de capas unas encima de otras.

- **Extrusión de material** (*Material Extrusion*):

Esta es la tecnología más utilizada en impresoras 3D personales y semiprofesionales, que son más rápidas, más baratas y más fáciles de usar que otras tecnologías de fabricación por adición. El proceso es el conocido como **FDM** (*Fused Deposition Modeling*) o Modelado por Deposición Fundida o **FFF** (*Fused Filament Fabrication*) o Fabricación con Filamento Fundido. Consiste en fundir un termoplástico y extruirlo a través de una boquilla e ir depositándolo capa por capa.

- **Fusión de capa de polvo** (*Powder Bed Fusion*):

Esta tecnología agrupa cinco procesos de impresión 3D: **EBM** (*Electron Beam Sintering*), **SLM** (*Selective Laser Melting*), **SLS** (*Selective Laser Sintering*), **SHS** (*Selective Heat Sintering*) y **DMLS** (*Direct Metal Laser Sintering*). Funciona básicamente mediante una capa de polvo del material con el que se desea construir, al cual se le aplica una fuente de energía térmica que lo funde con la forma deseada capa por capa hasta formar el objeto completo deseado.

- **Inyección de aglutinante** (*Binder Jetting*):

Consiste en la pulverización de un aglutinante líquido sobre un lecho de polvo que une el material. Cada capa se imprime de la misma forma que una impresora tradicional en papel (en este caso una solución aglutinante). Existen dos procesos asociados a esta tecnología: **PBIH** (*Powder Bed and Inker Head*) y **PP** (*Plaster based 3D Printing*).

- **Laminación de hojas** (*Sheet Lamination*):

En esta tecnología, las distintas capas laminadas del material se unen con pegamento. La impresora entonces rebana el contorno del objeto en la sección transversal para posteriormente retirar el exceso de material que rodea la pieza. Existen dos procesos que utilizan esta tecnología: **UC** (*Ultrasonic Consolidation*) y **LOM** (*Laminated Object Manufacturing*).

- **Deposición directa de energía** (*Direct Energy Deposition*):

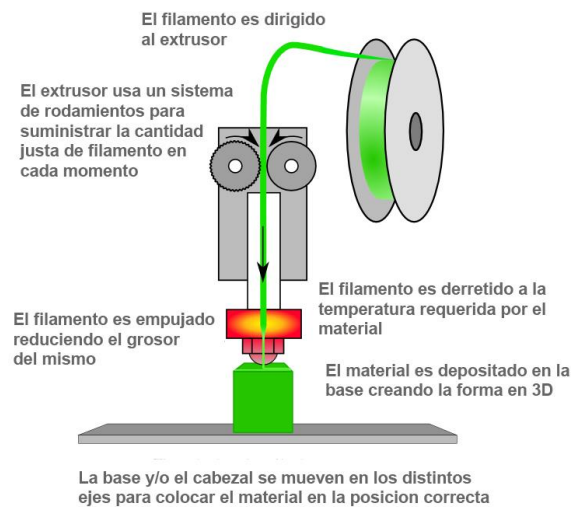
Una fuente de energía térmica funde el material justo cuando es depositado. Un proceso que utiliza esta tecnología es el **LMD** (*Laser Metal Deposition*).

2.1.4. ¿Cómo funciona una impresora 3D?

La tecnología que se utiliza en este caso es la MDF (*Modelado por Deposición Fundida*) o FFF (*Fabricación con Filamento Fundido*), que consiste en extruir y fundir un hilo de material a través de una boquilla ("*nozzle*") e ir depositándolo por capas para ir creando la figura.

Para ello se dispone de un cabezal o extrusor que contiene el *HotEnd*, que es el elemento encargado de fundir el material. Dicho cabezal puede moverse a lo largo de tres ejes (XYZ) para conseguir crear el objeto en tres dimensiones. El material se va depositando capa por capa sobre una base, que puede ser calefactada ("*cama caliente*") en función del material y las características de la pieza.

En la siguiente ilustración se muestra esquemáticamente el funcionamiento de este tipo de tecnología de impresión 3D.



1. Funcionamiento de FFF

2.1.5. EL proceso de impresión 3D

El proceso de impresión 3D son los pasos a seguir para poder realizar una impresión en tres dimensiones de un objeto.

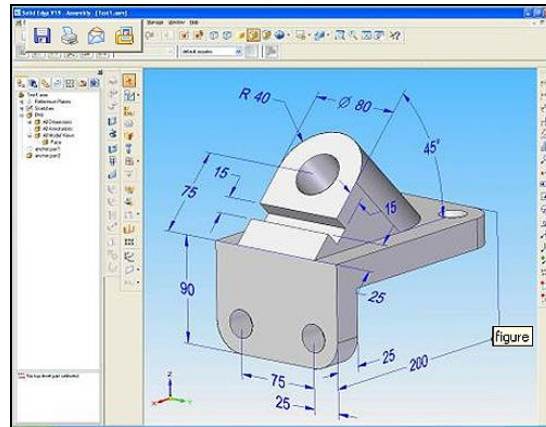
Este procedimiento consta de tres sencillos pasos bien diferenciados que se explican brevemente a continuación:

1º) Diseño 3D de la pieza

Lo primero que se debe hacer es obtener un diseño 3D tipo CAD hecho por ordenador. Este diseño deberá tener un formato STL ("*STereo Lithography*") cuya extensión es *.stl* y que será el formato que define la geometría del objeto en 3D necesario para pasar al siguiente paso. Este tipo de archivo no contiene información como el color, textura o propiedades físicas de la pieza.

Para poder obtener el diseño 3D de la pieza que queramos imprimir hay tres opciones:

- Diseño 3D de la pieza mediante programas informáticos de diseño en 3D y que puedan generar el archivo STL. Estos programas pueden ser de software libre (gratis, como OpenSCAD) o comerciales (AutoCAD, SolidWorks, Catia) y la mayoría son compatibles con dicha extensión debido a que es un formato común en este tipo de programas. Para este trabajo el programa utilizado ha sido la versión académica de Solid Edge.



2. Diseño 3D con el programa Solid Edge

- Descarga del archivo STL: Otra opción para obtener el diseño 3D es descargarlo de Internet, desde diferentes repositorios donde gente de todo el mundo sube sus propios diseños y el resto de usuarios pueda descargárselos gratuitamente o pagando. Por ejemplo, una de las páginas de descarga gratuita más conocidas es *Thingiverse*, desarrollada por MakerBot. [1]

- Mediante un escáner 3D: También se puede crear el archivo del diseño 3D de un objeto real mediante un escáner 3D, que es un dispositivo que analiza un objeto y a partir de él construye un modelo digital tridimensional generando del fichero STL.



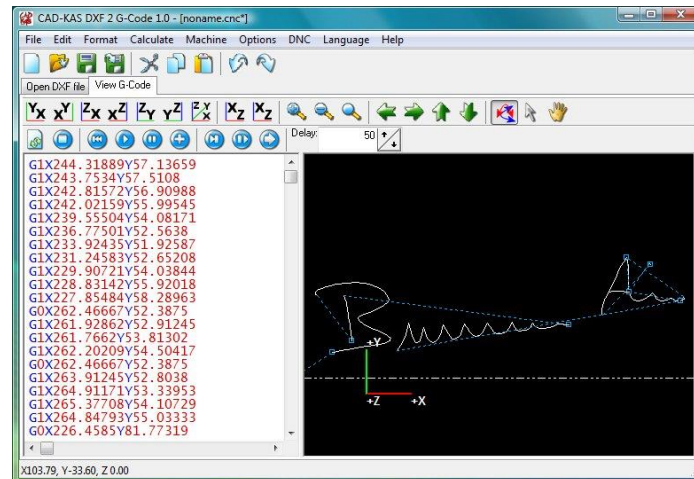
3. Escáner 3D portátil HandyScan 700 de Creaform (izquierda) y fijo Ciclop de BQ (derecha)

2º) Generación del archivo GCode

En este segundo paso se utiliza un **programa capeador**. Para ello se carga el archivo STL en dicho programa, que analiza la geometría de la pieza y el usuario configura multitud de parámetros de la impresión como pueden ser las velocidades, temperaturas, espesores, etc.

A partir de estos parámetros, el programa capeador genera un archivo en formato *GCode*, que contiene un lenguaje de programación de control numérico (CNC) que es el que la impresora entiende. En este lenguaje se encuentran todos los comandos o rutas de movimiento a ejecutar por la impresora durante la impresión, como son las velocidades o las trayectorias que va a seguir el extrusor durante la impresión.

Los programas capeadores más habituales son Slic3r y Cura, siendo éste último con el que se ha trabajado durante el proyecto y que se detallará más adelante.



4. Ejemplo de lenguaje de programación CNC

3º) Impresión 3D

El último paso del proceso será la impresión. Para ello habrá que mandar los comandos del archivo *GCode* a la impresora, y esto podrá hacerse por varios métodos:

- A través de un programa interfaz que conecte la impresora 3D al ordenador y transmita los comandos entre ambos. Algunos de los programas interfaz más utilizados son Repetier-Host, ReplicatorG y Pronterface, éste último es el utilizado durante el desarrollo de este proyecto y del que se hablará más adelante.

- Mediante un dispositivo externo conectado a la impresora, como puede ser una tarjeta SD o un dispositivo USB. Con estos dispositivos conteniendo el archivo *GCode* y disponiendo la impresora del puerto compatible, se puede iniciar así la impresión directamente.

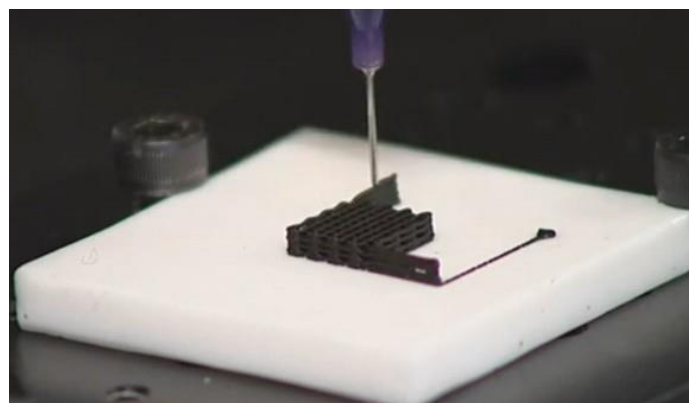


5. Puerto SD en la pantalla LCD de la Power Code

- A través de algunos programas capeadores también es posible realizar la impresión pues contienen la interfaz de conexión a la impresora. Estos programas pueden generar el fichero GCode y también comunicarse con el controlador de la impresora. EL software Cura es uno de estos programas, pero por su sencillez, en este trabajo la comunicación con la impresora se realizará con el Pronterface como ya se ha mencionado.

2.1.6. Materiales

Los materiales empleados en la impresión 3D son en su mayoría plásticos, pero el creciente y rápido desarrollo de las tecnologías de impresión 3D provoca una constante mejora de nuevas técnicas y una aparición de nuevos materiales continuamente, tales como arcilla, tinta de grafeno (imagen), materiales biodegradables, metales, o incluso tejidos orgánicos.



6. Impresión 3D con grafeno

La gran mayoría de las impresoras 3D utilizan unos rollos de filamento de material "termoplástico". Este plástico sale derretido del extrusor a alta temperatura y se endurece al enfriarse, formando las capas de la figura que se esté imprimiendo. Este proceso de fusión y solidificación repetidas veces es posible en los materiales termoplásticos, por lo que dichos plásticos son reciclables.

Las bobinas de materia prima con los que se puede imprimir se pueden adquirir en tiendas especializadas o comprar fácilmente a través de Internet. Estos filamentos se distribuyen generalmente en dos tipos en función del diámetro del hilo, que será de 1.75 mm o de 3 mm. El utilizado en este caso será un filamento de 1.75 mm.

Además existe una gran multitud de termoplásticos en función de su composición y propiedades, y se pueden adquirir en una amplia gama de colores, incluso transparentes o fluorescentes que pueden brillar en la oscuridad.

A continuación se comentan los principales materiales utilizados en las impresoras 3D de bajo coste:

2.1.6.1. Materiales principales: Termoplásticos

- **ABS:** *Acrilonitrilo Butadieno Estireno*

Es uno de los termoplásticos más utilizados en impresión 3D, debido a que es el más barato. Es reciclable, no biodegradable y produce gases en dosis tolerables, aunque pueden ser perjudiciales y peligrosos para personas y animales muy sensibles. Es un material tenaz, duro y rígido, de color mate, con resistencia química y a la abrasión, pero sufre con la exposición a rayos UV.

El ABS es un material bastante versátil, ya que se puede lijar con facilidad y, al ser soluble en acetona, permite realizar un pulido con un baño de ésta y un pegado sencillo utilizando pegamentos o la propia acetona. La densidad de este material es de entre 1,01 - 1,42 g/cm³ y su temperatura de impresión óptima es de 220 - 240 °C para el HotEnd, que es la punta del fusor o extrusor, y de 80 - 120 °C para la cama caliente o base sobre la que se imprime. Para una correcta adherencia a dicha cama durante la impresión, es necesario el uso de cinta de poliamida (Kapton), laca, o una mezcla de acetona con ABS.

Este plástico será el empleado durante este trabajo, en el que generalmente se imprimirá con el HotEnd a 230° C y la cama caliente a 110°C.



7. Piezas de ABS de la Power Code (izquierda) y recipiente de ABS (derecha)

- **PLA:** *Ácido poliláctico*

Es el otro de los termoplásticos más empleados para las impresiones 3D. Es reciclable y biodegradable, ya que procede normalmente del almidón de maíz o de la patata. En comparación con el ABS, es menos suave, pero sí más brillante, más frágil y con un mejor acabado en las esquinas de las piezas impresas. También se pueden obtener acabados con gran calidad superficial. El PLA es estable a la luz UV, lo que hace más difícil su decoloración. Puede ser rígido o flexible ("*Soft PLA*"), aspecto a tener en cuenta a la hora de la configuración para la impresión 3D. Su densidad es entre 1,2 - 1,4 g/cm³ y la temperatura del HotEnd para imprimir deber estar entre 180 - 220 °C, mientras que la de la cama caliente debe estar a unos 50 - 60 °C, aunque es posible imprimir este material con la cama completamente fría.



8. Tornillo y tuerca de PLA (izquierda) y pieza de "Soft PLA" (derecha)

2.1.6.2. Comparativa: ABS vs PLA

El 95% del mercado de las impresoras de bajo coste utilizan como material consumible el ABS y el PLA, por lo que escoger estos materiales es la opción más habitual y es importante conocer las características de ambos para decantarnos por uno de los dos. Aunque las dos opciones sean válidas para gran variedad de piezas, hay que tener en cuenta el tipo de pieza que queremos obtener y también la impresora 3D de que disponemos.

En cuanto al coste del material, los dos tienen precios muy similares en el mercado, siendo además los dos consumibles más baratos para el uso de impresiones 3D.

A continuación se muestra una tabla comparativa entre ambos materiales:

Característica	ABS	PLA
Polímero	Termoplástico	Termoplástico
Origen	Petróleo	Vegetal
Reciclable	Si	Si
Biodegradable	No	Si
Humos	Nocivos	No nocivos
Olor	Desagradable	Más agradable
Adherencia	Mala. Buena con laca o acetona	Buena
Acabado	Problemas con las esquinas	Detalles y esquinas nítidas
Warping*	Posible	Poco probable
Tacto	Suave	Menos suave
Color	Mate	Brillo
Rango de colores	Amplio	Muy amplio
Resistencia térmica	Alta	Baja
Resistencia mecánica	Alta. Duro	Baja. Frágil
Flexibilidad	Baja	Baja. Alta en "Soft PLA"
Estable con luz UV	No	Si
Absorbe humedad	Si	Si
Soluble en acetona	Si	No
Mecanizado posterior	Sencillo y versátil	Complejo y limitado
Pegado	Con acetona o adhesivos	Adhesivos
Ventilador de capa	No necesario	Recomendable

Velocidad impresión	Más lento	Más rápido
HotEnd	220 - 240 °C	180 - 220 °C
Cama caliente	80 - 120 °C	50 - 60 °C. No necesario

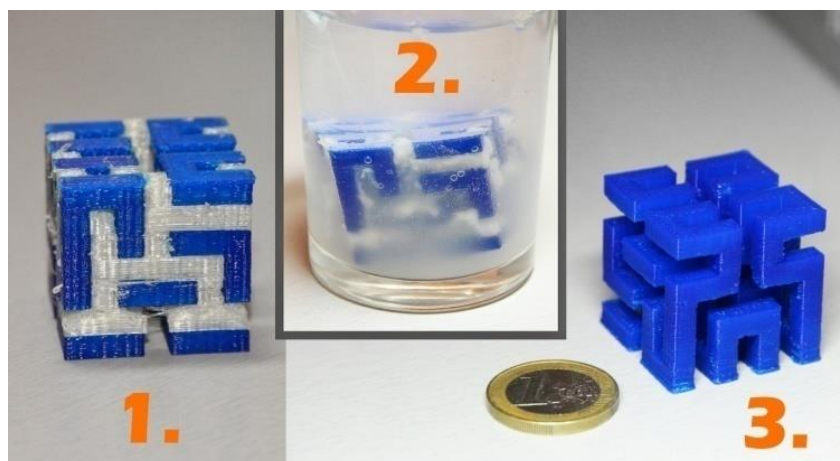
Tabla 1. Comparativa ABS vs PLA

**warping*: En inglés "alabeo" o "pandeo". Problema común en la impresión 3D que se produce cuando las esquinas de la base de piezas con gran superficie se levantan debido a la contracción del material. Es por ello que se usa la cama caliente en la impresión 3D o elementos para mejorar la adherencia a la base, como laca.

2.1.6.3. Otros plásticos y materiales compuestos

- **PVA: Alcohol Polivinilo**

Es un plástico especial utilizado en impresión 3D como soporte para zonas críticas de la pieza susceptibles de caer, o para formas complejas o aplicaciones especiales. Suele utilizarse en impresoras con varios cabezales de impresión, ya que mientras en uno de los cabezales se imprime con ABS o PLA, en otro se van creando los soportes con PVA. Este material es biodegradable y soluble en agua, por lo que presenta problemas en ambientes con humedad alta. Dicha solubilidad permite retirar fácilmente con agua los soportes después de la impresión. La temperatura de fusión es de 180 - 220 °C y la de la cama caliente debe ser de unos 50 °C.



9. Fabricación con PVA

- **PC:** *Policarbonato*

Es reciclable y no biodegradable. Es un material que ofrece una buena durabilidad y estabilidad junto a una resistencia a la temperatura. Es utilizado normalmente para prototipado, como por ejemplo, de herramientas. Debido a su mayor temperatura de fusión, el HotEnd deberá estar a 280 - 305 °C durante la impresión, y la cama caliente a 85 - 95 °C.



10. Herramienta de PC

- **HDPE:** Polietileno de alta densidad (*High Density PolyEthylene*)

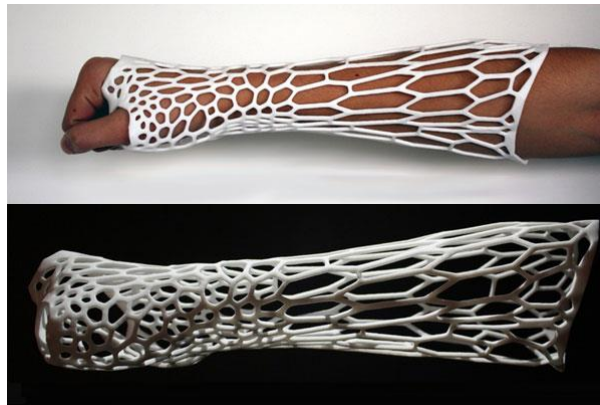
Es un plástico poco usado debido a que la pieza de este material tiende a encogerse y da lugar a problemas de curvado. Es un material reciclable, no biodegradable y se utiliza para fabricar envases plásticos desechables. Presenta resistencia a casi todos los disolventes y pegamentos. La temperatura de fusión es de 225 - 230 °C y la cama caliente no es necesario calentarla.



11. Envase de HDPE

- **Nailon:** *Nylon*

Es uno de los materiales más complejos para la impresión 3D debido a la falta de adhesión de la pieza a la base de cristal o aluminio, causando fallos y con un *warping* difícil de controlar. Es una fibra sintética con diversos usos, reciclable y no biodegradable. Coge humedad con facilidad por lo que es recomendable secarlo en un horno previamente a la impresión durante 3 - 4 horas. Como ventajas, el nylon es un material resistente, con baja viscosidad, muy resistente a temperaturas, flexible y con cierta transparencia.



12. Pieza de Nylon

- **Laybrick:**

Patentado por la marca *FormFutura*. Es una mezcla de polímero con polvo de yeso, que permite conseguir un acabado en las piezas con aspecto de yeso o arenisca, en función de la temperatura de extrusión, que variará entre los 160 °C (superficies más lisas) y los 220 °C (superficies más rugosas). La base puede estar a temperatura ambiente sin ocasionar problemas de *warping*. La pieza impresa necesitar de un proceso de secado durante 3 o 4 horas antes de retirarla de la base, y sobre la pieza resultante se puede aplicar pintura con facilidad.



13. Objetos impresos con Laybrick

- **Laywoo-D3:**

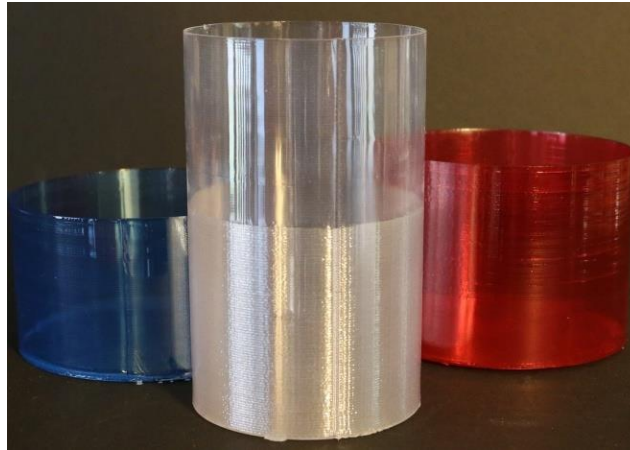
También está patentado por *FormFutura*. Es una composición de polímero y 40% de polvo de madera, lo que le da un aspecto final similar a la madera. Presenta un comportamiento térmico similar al PLA, con la diferencia de que se obtendrá un color más claro o más oscuro en función de la temperatura de impresión, las fluctuaciones de temperatura y el enfriamiento. A mayor temperatura de impresión, más oscura resultará la pieza. Este material de filamento frágil presenta poca deformación estructural y posibilidad de ser mecanizado. Se adhiere bien a la cama caliente y no produce problemas de *warping*. La extrusión se puede realizar entre 180 - 250 °C y la base no necesita ser calentada.



14. Búho de Laywoo-D3

- **T-glase:**

Es un compuesto polímero (*PET*) de la marca *Taulman*. Destacado por su uso en el sector de la alimentación ya que es el único aprobado por la FDA ("Food and Drugs Administration") de EEUU para el uso en contacto con los alimentos. Es reciclable, no biodegradable y no emite olores ni humos. Es un material fuerte y de alta resistencia. Presenta un color transparente gracias a su capacidad de cristalización, y se puede conseguir un aspecto vidrioso y cristalino aplicando un revestimiento de un esmalte puro y resistente llamado XTC-3D desarrollado por la empresa *Smooth-On*. La temperatura de fusión es de 212 - 224 °C (tratamiento muy similar térmicamente al PLA) y no ocasiona problemas de contracción.



15. Envase de T-glase

- **Filaflex - Ninjaflex:**

Así son los nombres comerciales de dos productos similares de material elastómero. Filaflex es un producto desarrollado por *Recreus* (España), mientras que Ninjaflex ha sido elaborado por *Fenner Drives* (EEUU). Es un TPE (*Termoplástico Elastómero*) con base de poliuretano y con ciertos aditivos para posibilitar la impresión 3D. Es un material flexible y elástico, pero también se puede combinar con materiales rígidos como ABS o PLA para hacer piezas compuestas con varios extrusores. Es resistente a la acetona y otros disolventes. Requiere de velocidades de impresión baja para evitar atascos del filamento y además debe imprimirse con mucha retracción para evitar el goteo del material. No es necesario calentar la base para su impresión y la temperatura de extrusión debe ser de 220 - 230 °C.



16. Zapatillas de Filaflex (izquierda) y piezas de Ninjaflex (derecha)

2.1.7. El proyecto RepRap

Dos momentos muy importantes son los encargados de que la impresión 3D sea, hoy en día, tan conocida. Por un lado la **aparición de la impresora Spectrum Z510 de Z Corporation en 2005**. Se trata de la primera impresora 3D de alta resolución y a todo color del mercado, 600 x 540 dpi y 24-bit de color, con un volumen de impresión de 254 x 356 x 203 mm y en su momento un precio de 49.900 dólares (44381 €).



17. Impresora 3D Spectrum Z510

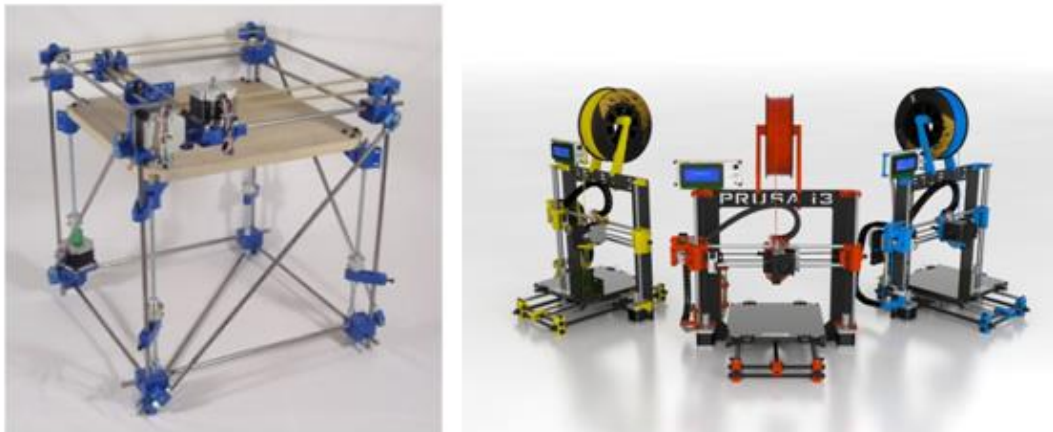
La aparición de esta impresora supuso la reafirmación del planteamiento de este tipo de dispositivos para el desarrollo no sólo de prototipos, sino también de piezas finales personalizadas, que no sólo tenían un uso meramente práctico para empresas, sino también para profesionales y consumidores finales. Con ellos comenzó el uso de la impresión con finales artísticos, lúdicos y caseros, por los que los servicios de impresión 3D empezaron a desarrollarse aún más debido al aumento de demanda.

Este aumento en la demanda y el deseo de poder controlar aún más la creación de piezas, sin necesidad de usar máquinas pesadas, caras, complicadas y llenas de patentes y sistemas propietarios, junto con el aumento de la filosofía del software libre, y más recientemente del hardware libre, llevaron a el otro punto de inflexión, **el nacimiento del proyecto RepRap en 2005**. El nombre de RepRap proviene de "*Replicating Rapid prototyper*".

La finalidad de este proyecto, iniciado por el ingeniero y matemático británico Adrian Bowyer de la Universidad de Bath (Reino Unido), era la creación de una impresora 3D Open Source que pudiera auto-replicarse, es decir, que pudiera imprimir ella misma las piezas para desarrollar otra impresora igual o mejor. Su tecnología se basa en una la Fabricación por Filamento Fundido (FFF).

Todas las impresoras 3D desarrolladas directamente a partir del proyecto RepRap son libres y con licencia GNU GPL (*General Public License*). Esta licencia de software libre y hardware libre permite que podamos copiar, estudiar, distribuir y mejorar sus diseños y código fuente, ya que las piezas no están sujetas por un copyright, patente o registro de ningún tipo.

La primera impresora 3D RepRap fue la impresora Darwin, en 2007, y a ésta la siguió la impresora Mendel en octubre de 2009. Posteriormente llegaron la Prusa Mendel y Huxley en 2010. A todas ellas se les otorgó el nombre de importantes científicos dedicados a la biología y la evolución de las especies. Unas generaciones más tarde llegaría la que es probablemente la impresora 3D más popular de la comunidad RepRap, la Prusa i3, nombre proveniente de su creador Josef Prusa y donde i3 hace referencia a la iteración 3.



18. Impresora 3D Darwin (izquierda) y Prusa i3 (derecha)

La importancia del proyecto RepRap para explicar el enorme desarrollo actual es grandísima, ya que no sólo permitió sentar las bases de la gran mayoría de impresoras 3D que existen hoy en día y que siguen apareciendo, sino que también obligó a que la industria empezara a rebajar costes y precios, de forma que la impresión tridimensional se ha hecho muchísimo más asequible ahora que hace unos escasos 8-10 años. Como ejemplo, las impresoras libres de este tipo rondan precios de entre 300 y más de 1.000 €, llegando a superar los 2.000 € las versiones propietarias más populares, desarrolladas a partir de las mismas.

2.1.7. El futuro de la impresión 3D

Las impresoras 3D aún se encuentran en algunos casos en su infancia y van a seguir evolucionando durante los próximos años hasta llegar a ser una parte muy importante de nuestra sociedad y de cómo entendemos la fabricación de objetos y productos. La mayoría de analistas la consideran ya una de las tecnologías más prometedoras y con mayores posibilidades de expansión de este siglo, a la par con las energías alternativas.

Como ya hemos visto los diferentes usos que tienen actualmente y que se están desarrollando para el futuro, seguramente veremos su división y especialización en tres grandes campos, claramente diferenciados.

Por un lado su desarrollo industrial seguirá buscando aumentar el volumen de impresión y rapidez, así como su aplicación tanto en materiales estructurales convencionales como en otros alternativos. Veremos por tanto una mayor integración entre los sistemas aditivos, sustractivos y de cambio de forma, para un desarrollo más eficaz y con menor gasto de materiales y energía, tanto en la creación de edificios como de maquinaria, vehículos y productos de fabricación masiva, incluyendo dispositivos, ropa y objetos diversos de uso diario.

La impresión tridimensional como sistema de producción habitual en la industria hará que la personalización sea algo mucho más habitual y probablemente la producción en los próximos años empiece a centrarse más en el usuario, sus necesidades y características individuales, que en la fabricación masiva, permitiendo un crecimiento más sostenible. El valor añadido se centrará no en la cantidad sino en el grado de adecuación al usuario.

Otro campo de expansión será justamente lo que se nos muestra hoy por hoy cada vez más cercano, su desarrollo como sistemas de creación de objetos en oficinas, talleres y casas particulares. Las impresoras 3D terminarán siendo un periférico tan normal como las impresoras convencionales, que incluso podrían empezar a entrar en decadencia igual que está pasando con los ordenadores personales, conforme los dispositivos móviles y *wearables* (smartwatches, zapatillas con GPS, pulseras inteligentes, etc.) vayan normalizándose.

Pero este desarrollo en el ámbito del consumo además tendrá una gran importancia en el reciclaje, haciendo que el plástico y otros elementos de desecho terminen reutilizándose cada vez más directamente por la población, al poder darles una nueva forma de manera incluso más sencilla que reciclando papel.

El otro gran ámbito de la impresión 3D en el futuro, será su uso biomédico y alimenticio. Ya vemos cada día ejemplos de cómo está revolucionando poco a poco la industria de las prótesis e incluso de creación de tejidos y órganos. Las predicciones

aseguran que la impresión de órganos funcionales y compatibles será viable en las próximas décadas, haciendo de los trasplantes no sólo una técnica de último recurso, sino algo habitual.

Además existe el interés por el desarrollo de carne artificial y se están usando ya las impresoras 3D en repostería y creación de alimentos. La combinación y desarrollo conjunto de ambas tecnologías abre la posibilidad de la creación de comida totalmente artificial, con las innumerables y polémicas ventajas, y desventajas, que conllevará tanto moralmente como genética y sanitariamente.

Dicho todo esto, muchos consideran la impresión tridimensional como la nueva revolución industrial más allá de la era de la información, pero será la evolución de esta tecnología y su uso por parte de la sociedad el que marque que ocurrirá en las próximas décadas.

2.2. Optomecánica

Se entiende por optomecánica la fabricación y utilización de componentes y dispositivos ópticos, que incluye:

- La producción de piezas tales como:
 - Soportes ópticos
 - Tubos de lentes
 - Posicionadores lineales y rotativos
 - Alineadores de fibra y sistemas de guiado del haz
 - Raíles
 - Postes
 - Mesas ópticas
 - Micrómetros, goniómetros, tornillos y juegos de tornillos
- Diseño y envasado de trenes ópticos robustos y compactos
- Diseño optomecánico e integración con el paquete exterior
- Fabricación y mantenimiento de materiales de fibra óptica

La optomecánica se utiliza para proporcionar una gran variedad de opciones de montaje o de posicionamiento para esta amplia gama de productos y aplicaciones ópticas. El reto de la optomecánica se encuentra en la preservación de la posición, la forma y las propiedades ópticas de los elementos, que tienen tolerancias muy estrechas, tales como micras, microrradianes, y fracciones de una longitud de onda. Por tanto, los sistemas ópticos requieren de un buen rendimiento, estabilidad dimensional e integridad estructural para hacer frente a cargas mecánicas, ambientales, térmicas y dinámicas.

3. Marco regulador. Aspectos legales

La impresión 3D es una tecnología que propicia la fabricación casera o profesional de prácticamente cualquier objeto que se desee partiendo de un diseño digital. La impresora imprime el diseño, transformando los bits en objetos físicos. Así, las principales cuestiones legales sobre la utilización de las impresoras 3D son las siguientes:

3.1. Propiedad intelectual

- **Descarga ilegal de modelos 3D:**

Del mismo modo que, en la actualidad es posible descargar ilegalmente películas, canciones o libros electrónicos, también es posible acceder a archivos que contienen diseños tridimensionales, descargarlos directamente o a través de redes de pares (P2P) e imprimirlos. La descarga de modelos 3D sin la previa autorización del titular de los derechos de propiedad intelectual, es ilegal.

- **Transformación de modelos 3D:**

El autor de un diseño tridimensional tiene el derecho exclusivo de decidir si éste puede ser transformado o no, lo que incluye la posibilidad de prohibir que se hagan cambios en el modelado o, incluso, que se convierta su diseño digital en una obra tangible. Por tanto, el usuario que cambie, transforme o imprima un diseño en contra de la voluntad del autor estará cometiendo un acto ilegal.

- **Creación de modelos 3D:**

Los usuarios pueden crear modelos 3D con programas de diseño gráfico. Las creaciones realizadas por un usuario otorgan a éste todos los derechos de propiedad intelectual sobre sus obras. Ahora bien, si la sube a internet, ¿podrá oponerse de forma efectiva a que otros la usen en contra de su voluntad?

En el caso de que una persona utilice un escáner 3D para extraer el diseño digital de un objeto físico y lo sube a Internet, esta persona no tiene los derechos de propiedad intelectual, es más, podría haber infringido algún derecho ya que habrá reproducido y transformado la obra al digitalizarla, y la habrá puesto a disposición del público.

- **Canon digital por las copias privadas:**

Gracias a las impresoras 3D, el usuario que adquiere lícitamente un objeto con propiedad intelectual podrá hacer un número limitado de copias de éste. La Ley se lo permite, con una condición: que pague con una remuneración equitativa al autor por la copia privada que haga. Esta remuneración es conocida por la sociedad como "canon digital".

3.2. Propiedad industrial

- **Patentes:**

La patente es un título concedido por el Estado (o por entidades internacionales, como la Unión Europea) que otorga a su titular el derecho exclusivo de oponerse a toda explotación de la invención protegida que se realice sin su consentimiento. Las impresoras 3D son capaces de imprimir objetos registrados como patentes, es decir, piezas de maquinaria, utensilios y otros elementos útiles cuyo monopolio de explotación ha comprado una persona o empresa. El titular de una patente adquiere el derecho temporal de ser el único que pueda fabricar el objeto.

Sin embargo, el artículo 52.1 a) de la Ley 11/1986 impide a los titulares de la patente oponerse a "*actos realizados en ámbito privado y para fines no comerciales*", por lo que las impresiones 3D de objetos patentados realizadas en la propia casa del usuario y para sus propias necesidades no serían ilegales. Con la regulación actual, los titulares de los derechos de la patente se encuentran desprotegidos. Pero, por el contrario, dichos titulares podrían protegerse aplicando el artículo 51 de la Ley de Patentes que les permite impedir la entrega u oferta de "*medios destinados a la creación de sus objetos protegidos*". En definitiva, la normativa vigente no está pensada para lidiar con la nueva tecnología de impresión 3D, y es evidente pensar que aparecerá una normativa adaptada en los próximos años.

A principios de 2014 caducó la patente sobre el sistema de impresión SLS (*Selective Laser Sintering*), utilizado por buena parte de las impresoras disponibles en el mercado. Y hay que tener en cuenta que durante 2015 y en 2016 van a expirar otras dos de las patentes principales, por lo que es probable que próximamente se produzca un aumento de la competencia entre los diferentes fabricantes. El precio de las impresoras 3D volverá a disminuir, donde se verán muy beneficiados los consumidores.

- **Diseño industrial:**

Un molde o plano tridimensional novedoso y singular puede ser objeto de protección de un diseño industrial. Esta protección opera de forma similar a como lo hace la patente, por lo que su impresión o fabricación privada también podría ser ilegal. Pero también se puede apreciar que la legislación que regula el diseño industrial tampoco está preparada para la impresión 3D, ya que el artículo 48 a) de la Ley 20/2003 de Protección Jurídica del Diseño Industrial excluye igualmente el ejercicio de los derechos ante "*actos realizados en un ámbito privado y con fines no comerciales*".

- **Marca:**

La verdadera vulneración del Derecho de Marcas se produce cuando haces uso de esta marca en el mercado, por lo que una impresión de un objeto de una marca no estará perjudicando si su finalidad es para uso doméstico.

Hay un tipo de marca que si se puede ver afectada: la **marca tridimensional**. Con efectos también similares a los de la patente, la impresión de objetos cuya forma coincida con una marca tridimensional, puede ser ilegal en determinados casos. La marca tridimensional es aquella que se corresponde con cuerpos representados en tres dimensiones, como envases, envoltorios, botellas, cajas o, incluso, la forma de un producto, siempre y cuando se distinga el producto y no corresponda a una forma usual en el mercado. Ejemplos de marcas tridimensionales son, por ejemplo, la forma de la botella de Coca-Cola o una pieza de Lego.

3.3. Derecho de imagen

- **Muñecos personalizados:**

Nuestra legislación indica que está prohibido realizar copias (de cualquier tamaño) de personas reales, a menos que el individuo copiado haya dado su consentimiento expreso para ello.

3.4. Otros ámbitos jurídicos

- **Impresión de armas:**

Es ilegal imprimir un arma de fuego, es decir, que pueda lanzar un proyectil por la acción de un combustible propulsor, conforme se estipula en el artículo 4 del Reglamento de Armas (Real Decreto 137/1993, 29 de enero, BOE 55/1993) y en el Código Penal. Está expresamente prohibida la fabricación, además de tenencia y uso, de las armas de fuego que sean el resultado de modificar sustancialmente las características de fabricación u origen de otras armas, sin la oportuna autorización del modelo o prototipo. Hay que aclarar que ninguna ley dice que un arma de fuego deba estar fabricada con piezas metálicas para ser considerada como tal. Las sanciones pueden llegar hasta los 3 años de cárcel.

- **Impresión de contenidos ilícitos:**

También es ilegal, y puede ser motivo de condena (incluso privativa de libertad), la impresión de imágenes en 3D de determinados contenidos cuya fabricación o mera posesión, conforme estipula la normativa penal, es delictiva.

- **Comercializadores de impresoras 3D:**

Éstos han de tener en cuenta que les son de aplicación (ya sea por restricción o por protección) las normativas de propiedad intelectual de programas de ordenador, que protege el software original, y las patentes, que protegen las invenciones novedosas y susceptibles de aplicación industrial, como por ejemplo, un nuevo tipo de impresora 3D.

La tecnología de la impresión 3D ofrece un panorama legal innovador. Cada usuario podrá poseer una fábrica de objetos personalizados e imprimirlos bajo demanda. La figura del producto descatalogado desaparecerá. El alcance objetivo y territorial de la protección por patentes quedará mermado. Disminuidos estos límites, todo usuario podrá disponer de los productos de diseño más moderno que desee.

- **Responsabilidad por productos defectuosos:**

Cuando un consumidor adquiere un producto defectuoso y este le causa un daño, el productor ha de indemnizarle. Es decir, todo productor es responsable de los daños que causen los productos defectuosos que pone en el mercado. Para poder exigir dicha

indemnización, el consumidor tiene que probar tres aspectos: que el producto adquirido tenía un defecto; que ha sufrido un daño; y que el daño ha sido provocado por el defecto del producto (relación de causalidad). Todo ello está establecido en los artículos 135 y siguientes de la Ley General para la Defensa de los Consumidores y Usuarios.

En el caso de la impresión 3D, hay que tener en cuenta que todos los usuarios de impresoras 3D serán productores, pero no quiere decir que sean responsables de los daños causados por los objetos que imprimen, pues el artículo 140.1 c) exonera a quienes no actúen en el marco de una actividad profesional o empresarial. Es decir, habrá que determinar si la venta de productos impresos es una actividad empresarial o no.

4. Impresora 3D Power Code

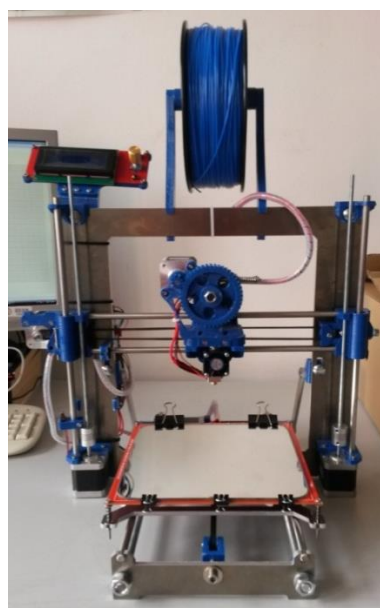
La impresora con la que se va a llevar a cabo este proyecto es la Power Code, un modelo de impresora 3D de bajo coste diseñado por Manuel Palacios y basado en el modelo de Josef Prusa (Prusa i3). Está integrado dentro de los proyectos *Open Source*, es decir, de *código abierto*, lo que fomenta la evolución del usuario y la libertad de hacer modificaciones, que provoca que esté en un continuo proceso de mejora.

Esta impresora es un modelo mejorado de la Prusa i3, que a su vez es una impresora que rompe con la estructura de su predecesor, la Prusa i2, ya que simplifica la estructura metálica, dejando espacios más abiertos y accesibles y ampliando la altura máxima de impresión.

Se distribuye en kits automontables al ser una impresora 3D de hardware libre que sigue la filosofía DIY (*"Do It Yourself"*). Es más silenciosa y limpia que otros kits similares.

La estructura de esta impresora consta de un marco de aluminio vertical sobre unas varillas roscadas horizontales que, unidas a éste, forman la base horizontal. Los ejes X e Y se desplazan a través de varillas lisas, mientras que el eje Z (vertical) es movido por varillas roscadas verticales, guiado por varillas lisas. El eje Y es sobre el que se desplazada la base o cama caliente, mientras que en el eje X se desplaza el carro que contiene el extrusor.

El movimiento es proporcionado con motores paso a paso, que transmite en movimiento en los ejes X e Y mediante poleas y correas, y en el eje Z directamente sobre las varillas roscadas.



19. Impresora 3D Power Code

4.1. Características

A continuación se muestra un resumen de las características técnicas que presenta la impresora 3D Power Code:



- Fabricante: RepRap
- Tecnología: FDM - FFF
- Volumen de impresión: 200x200x200 mm
- Número de cabezales: 1
- Espesor de capa: 0,1 - 0,3 mm
- Materiales: ABS, PLA, HIPS
- Materiales opcionales: Nylon
- Filamento. 1,75 mm
- Archivos: Formato STL (.stl)
- Conexión: USB, tarjeta SD
- Pantalla LCD
- Extrusor: *Greg-Wades-dviejo*
- HotEnd: modelo E3D V6
- Boquilla o *Nozzle*: Ø0,4 mm
- Temperatura máxima HotEnd: 300 °C
- Temperatura máxima cama caliente: 120 °C
- Sistema de nivelación de cama caliente: 4 puntos
- Máxima velocidad de impresión: 100 mm/s

4.2. Partes y componentes

La impresora se ha montado de manera manual para este trabajo, y sigue una estructura similar a otros kits automontables, por lo que es necesario conocer cuáles son las partes y elementos que componen la Power Code, que son:

4.2.1. Estructura mecánica

Está formada por elementos estructurales, elementos que transmiten movimiento o elementos de fijación de componentes electrónicos. A continuación se presenta una lista de dichos elementos presentes en la máquina:

Elemento	Cantidad	
Kit piezas estructurales (aluminio sin lacar)	1	
Kit varillas lisas y roscadas	1	
Rodamientos lineales LM8UU	11	
Rodamientos poleas eje X e Y 623ZZ	2	
Rodamientos 8mm extrusor	3	
Acople flexible 5x5 mm	2	
Polea aluminio T2.5	2	
Correa T2.5 (1m)	2	
Tornillo extrusor ("Hobbed Bolt")	1	
Muelle extrusor	2	
Kit piezas de plástico ABS	1	
Bridas	10	



Guía-cables (1m)	1,5	
Tornillería	1	

Tabla 2. Elementos de la estructura mecánica

4.2.2. Componentes electrónicos

Esta parte está formada por los componentes conectados electrónicamente, los que generan el movimiento, los elementos encargados de calentar y los que determinan la temperatura:

Componente	Cantidad
RAMPS 1.4 para doble extrusor	1
Stepper o Driver A4988 + disipador + jumpers	5
Pantalla LCD	1
Arduino Mega 2560 + cable USB	1
Motor paso a paso Nema 17	5
Final de carrera	3
HotEnd E3D V6	1
Cama caliente (+ espejo + muelles + pinzas)	1
Termistor 100k	1
Kit de cables	1
Fuente de alimentación 600 W	1

Tabla 3. Componentes electrónicos

- Arduino Mega 2560

Arduino es una plataforma electrónica abierta para la creación de prototipos basada en software y hardware flexibles y fáciles de usar. A través de sus pines de entrada, puede recibir información de multitud de sensores y puede afectar a aquello que le rodea controlando actuadores como motores, luces, resistencias calefactoras y otros elementos.

Arduino Mega 2560 se trata de una placa expansión del *Arduino Uno* tradicional basado en un microcontrolador de 16 MHz ATmega2560. Su tensión de

funcionamiento es de 5V, con lo que puede ser alimentada mediante conexión USB. A diferencia del *Arduino Uno* tradicional de 14 pines de entrada/salida digital, éste dispone de 54 pines, de los cuales 15 pueden ser usados como PWM (Modulación de ancho de pulsos) y 16 entradas analógicas, permitiendo tener muchas más conexiones.

En el microcontrolador de esta placa Arduino se encuentra programado el Firmware de la impresora 3D, por decirlo de otra manera, es el cerebro de la impresora.



20. Arduino Mega 2560

- Ramps 1.4

RAMPS son las siglas de RepRap Arduino Mega Pololu Shield. Se trata de una placa electrónica (o Shield) que se conecta al Arduino Mega 2560. Estos dos elementos en conjunto controlan todas las señales de entrada y salida para lograr la impresión 3D.

En esta placa se conectan los sensores, actuadores y la fuente de alimentación. Los sensores son los finales de carrera y los termistores. Los actuadores son los motores, los calefactores y los drivers que controlan los motores.

Además la Ramps 1.4 también dispone de conexiones para otros elementos adicionales como ventiladores, pantalla LCD, etc.



21. Ramps 1.4

- Motor paso a paso Nema 17

Es un dispositivo electromecánico bipolar que transforma impulsos eléctricos en movimientos angulares discretos. Cada paso realiza un giro de 1.8° , es decir, 200 pasos hasta completar un vuelta, teniendo una alta precisión y repetitividad en cuanto al posicionamiento.

En la impresora 3D Power Code se utilizan cinco de estos motores: uno para el eje X, otro para el eje Y, dos para el eje Z y otro para el extrusor.



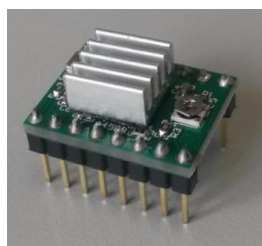
22. Motor Nema 17

- Drivers de los motores:

Son los elementos encargados de controlar y alimentar a cada motor paso a paso. Llevan incorporado un potenciómetro para poder regular la intensidad suministrada al motor.

La utilización de estos drivers es necesaria, ya que Arduino Mega 2560 por sí solo no es capaz de suministrar el motor la corriente necesaria.

La intensidad que se debe fijar en cada controlador es: 200 mA para el motor del eje X, 200 mA para el eje Y, 400 mA para el controlador del eje Z con controla dos motores, y 400 mA para el motor del extrusor. Los drivers alcanzan altas temperaturas debido a estas intensidades, por lo que hay que colocarles unos disipadores de calor que vienen en el kit.

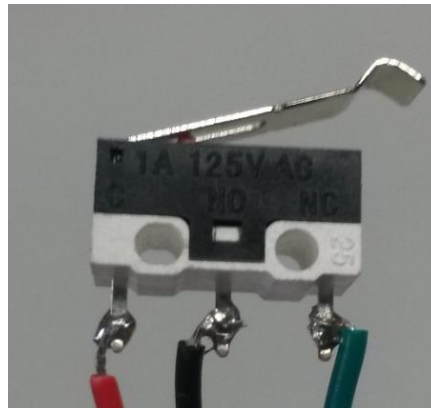


23. Driver

- Final de carrera

Es un sensor de contacto o pequeño interruptor que se sitúa al principio o final del recorrido de un elemento móvil, con el fin de enviar una señal que modifique el estado del circuito.

En este caso se dispone de un final de carrera en el principio de cada eje para determinar el punto (0,0,0) de la máquina.



24. Final de carrera de 3 pines

- Termistor NTC 100 k

Es un sensor resistivo de temperatura, con un valor máximo de lectura de 260 °C. Su funcionamiento se basa en la variación de la resistividad (en este caso variación negativa - NTC), que presenta un semiconductor con la temperatura.

En la impresora se dispone de dos de estos termistores: uno en la cama caliente y otro en el HotEnd del extrusor, con el fin de poder medir y controlar la temperatura y su variación durante la impresión.



25. Termistor NTC de 100 k

- Cama caliente MK2B Dual Power

Es la base horizontal donde se va depositando el material durante la impresión. Para evitar que ciertos materiales se deformen debido al cambio de temperatura entre el HotEnd y la base, esta placa deberá poder calentarse para dichos materiales. El proceso de calentamiento es relativamente lento debido a que es una superficie grande con una inercia térmica alta que disipa mucho calor.

Para ello incorpora una pista de cobre de 35 μm que se calienta por efecto de la propia resistencia al paso de corriente, y puede ser conectada a 12 o 24 V. La base tiene un agujero central para alojar el termistor de 100 k que controlará su temperatura, y que va fijado a la cama en su parte inferior mediante cinta kapton, ya que ésta soporta las altas temperaturas.

Esta cama caliente está nivelada por cuatro puntos mediante cuatro tornillos y muelles, y sobre ella se dispone de un espejo (fijado mediante pinzas) sobre el que se depositará el material. El uso de este espejo en la impresión es principalmente por dos motivos:

- El cristal transmite muy bien el calor procedente de la cama caliente a la pieza que se está imprimiendo.
- La superficie del cristal es muy lisa, lo que provoca una buena adherencia y buen acabado en la cara inferior del objeto impreso.



26. Cama caliente MK2B Dual Power

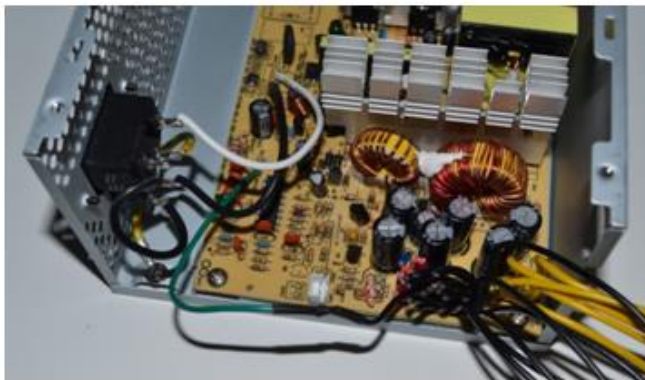
- Fuente de alimentación

Es la encargada de transformar la corriente alterna doméstica en corriente continua para alimentar los componentes electrónicos de la impresora 3D. La fuente utilizada es de 600 W, que proporciona una intensidad de al menos 15 amperios suficiente para el funcionamiento de los elementos.



27. Fuente de alimentación de 600W

Para poder usar de forma fácil y rápida la fuente de alimentación, se ha preparado dicha fuente cortocircuitando el cable verde a masa (GND), dejando 6 cables negros y 6 amarillos que serán los que alimenten la placa electrónica a 12 V.



28. Preparación de la fuente de alimentación

- HotEnd E3D V6

El HotEnd es uno de los elementos más importantes de la impresora 3D, pues es el encargado de fundir el material con el que se fabrica la pieza y depositarlo capa por capa sobre la cama caliente.

Este modelo, el E3D V6, está formado por componentes metálicos para resistir la alta temperatura que alcanza, que normalmente será de 230 °C en este caso. Dichos componentes son:

- Disipador y bloque calefactor de aluminio
- Barrera térmica de acero inoxidable
- Boquilla de latón (o "nozzle") de Ø0.4 mm

- Termistor NTC de 100 k
- Cartucho calefactor de 12 V y 40 W
- Ventilador de 12 V de 30x30x10 mm
- Cable con resistencia a altas temperaturas de fibra óptica (termistor) 150 mm
- 2 x puntas metálicas de 0.75 mm para la unión de cables
- 4 x tornillo M3 x 16
- Tornillo M3 x 10
- Tobera de refrigeración
- 800 mm de tubo PTFE y su acoplamiento



29. HotEnd E3D V6

- Pantalla LCD

La pantalla LCD muestra información durante la impresión, como la temperatura, el tiempo de impresión o la posición del HotEnd respecto de cada eje.

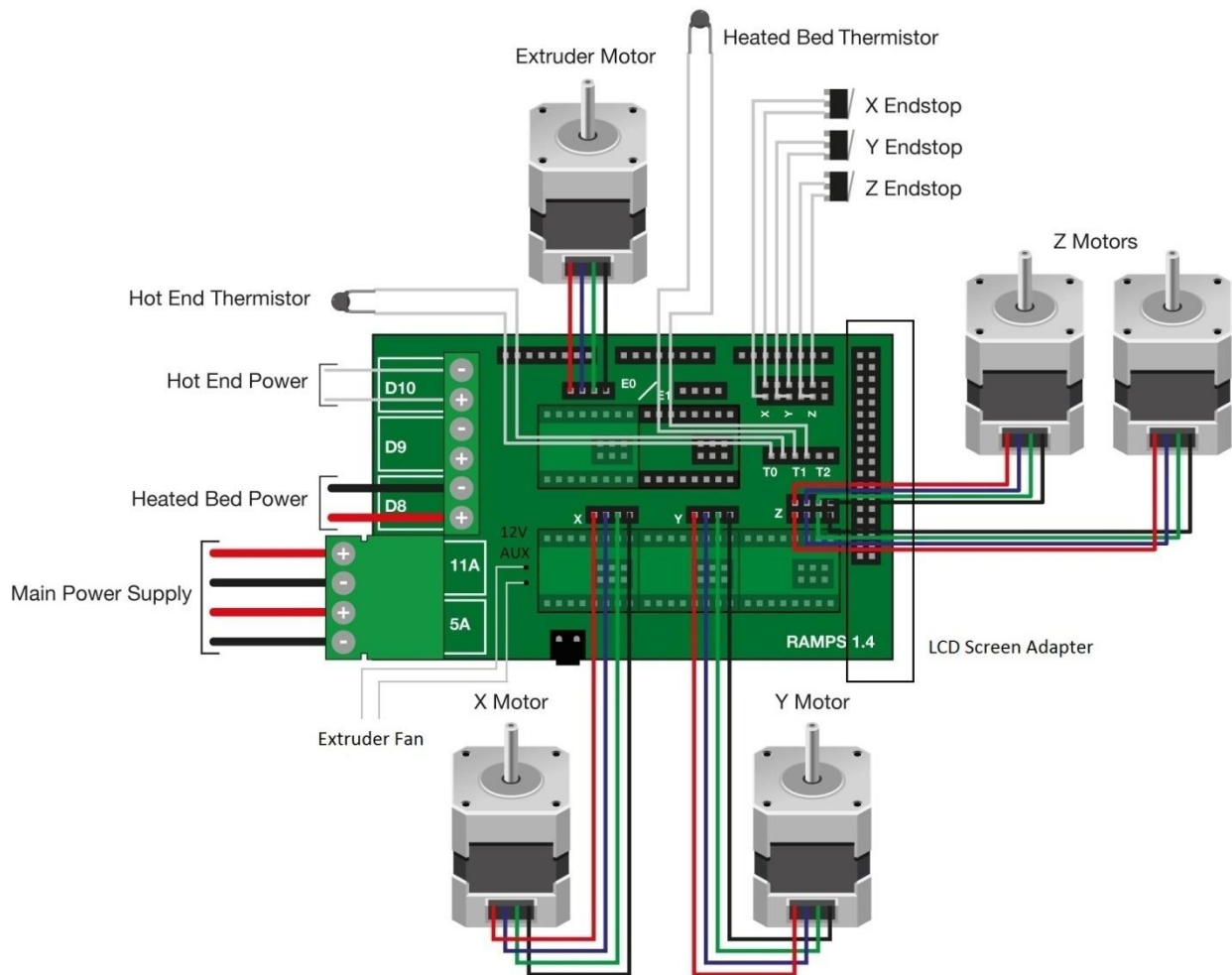
También es posible controlar la impresora 3D desde la pantalla, sin necesidad del ordenador, ya que por medió del controlador que incorpora, se pueden ejecutar comandos como mover los ejes, establecer temperaturas, o incluso iniciar una impresión 3D, ya que incorpora un lector de tarjeta SD para poder cargar directamente el archivo de la pieza a imprimir.



30. Pantalla LCD

4.3. Conexiones

Como ya se ha mencionado, la placa electrónica empleada por la impresora 3D Power Code es la RAMPS 1.4., que a su vez va conectada con un Arduino Mega 2560. A continuación se muestra un esquema de las conexiones de los componentes electrónicos a la RAMPS 1.4.



31. Conexiones a la Ramps 1.4

Para poder realizar la conexión del ventilador del HotEnd ("Extruder Fan"), se han tenido que soldar dos pines a la salida auxiliar de 12 V de la placa, ya que no venían soldados inicialmente en la Ramps 1.4.

4.4. Calibración mecánica

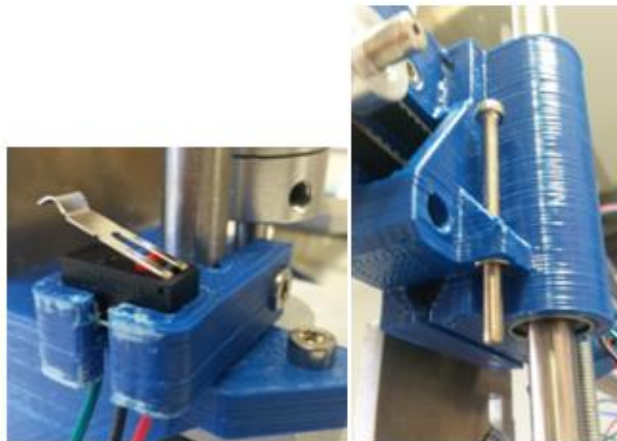
Una vez la impresora esté montada físicamente, debe ser calibrada mecánicamente. Las comprobaciones para verificar si la impresora está bien calibrada deben realizarse periódicamente, ya que es probable que se desajusten algunos de sus elementos debido a las vibraciones que sufre la máquina durante las impresiones.

Para ello, lo primero será nivelar la impresora y sus ejes por medio de un nivel de burbuja. La impresora debe situarse en una superficie completamente plana para después, comprobar con el nivel de burbuja que el eje X está completamente horizontal. En caso de no estarlo, se debe manipular manualmente actuando sobre las varillas roscadas del eje Z hasta conseguir que el eje X este nivelado.

Después se procede de manera similar con el eje Y, midiendo con el nivel de burbuja sobre el espejo de la cama caliente. Para variar su inclinación se actúa sobre los tornillos de las cuatro esquinas de la base. Pero esta nivelación será orientativa, ya que la base se calibrará de forma óptima más adelante. A continuación se debe comprobar la perpendicularidad entre los 3 ejes de la impresora, que tienen que ser ortogonales.

También es muy importante verificar las correas de los ejes X e Y, que deben estar tensas, pero sin llegar a tensarlas al límite. Si las correas están destensadas, ocurriría el fenómeno de *backflask*, en el que las paredes de los objetos impresos no quedarías lisas, sino con ondulaciones o desviadas respecto de algún eje, debido al deslizamiento entre la polea y la correa.

El en siguiente paso se debe conectar la maquina al ordenador con ayuda del programa Pronterface (explicado más adelante) con el que podrán moverse los ejes. Después hay que descender el eje Z hasta que casi toque el espejo, a unos 0.1 mm, para colocar el final de carrera del eje Z. Se podrá modificar la altura del punto 0 del eje Z por medio del tornillo que incorpora el carro del eje X. Dicho tornillo será el que actúe sobre el final de carrera del eje Z.



32. Final de carrera eje Z (izquierda) y tornillo tope (derecha)

La calibración de la distancia entre el HotEnd y el espejo de la cama caliente se modifica actuando sobre el tornillo de final de carrera del eje Z y los tornillos de la base. Con el tornillo de final de carrera fijo, se deben medir en cuatro puntos la distancia entre HotEnd y el espejo. Dicha distancia se debe medir en el final de carrera del eje Z ($Z=0$) y esta distancia debe ser el espacio suficiente para que pase rozando un folio. Ésta será la distancia óptima para imprimir la primera capa de material. Se procede de igual manera en los cuatro puntos tomados, actuando sobre los cuatro tornillos de la base hasta que la distancia sea la óptima en dichos puntos.

Por último, se deben lubricar las varillas lisas y roscadas de la máquina para un correcto funcionamiento que haga más suaves y silenciosos los movimientos de los ejes. Para ello, se pueden utilizar lubricantes para máquinas como 3 en 1, aceite o grasa.

5. Firmware

El firmware es un conjunto de instrucciones de una máquina para propósitos específicos, grabado en un chip, normalmente de lectura/escritura (ROM, EEPROM, flash, etc.), que establece la lógica primaria de más bajo nivel que controla los circuitos electrónicos de un dispositivo de cualquier tipo. Se podría decir que el firmware es un software que maneja físicamente al hardware.

5.1. Marlin

El firmware utilizado en la impresora es Marlin, que es el encargado de permitir a la placa electrónica recibir las órdenes del ordenador y enviarlas a los componentes que forman la impresora 3D.

Este software se debe cargar a la placa gracias al Arduino, habiendo configurado los parámetros previamente. Para ello, se deben seguir los siguientes pasos:

- 1. Descargar el firmware que se desea instalar, en este caso Marlin, que se puede descargar directamente de la página de RepRap: reprap.org/wiki/Marlin
- 2. Descargar e instalar el software de Arduino. Éste es un entorno de desarrollo de la placa de Arduino y es el software que nos permite subir el código a la placa. Se puede descargar desde la propia página de Arduino: www.arduino.cc/en/Main/Software
- 3. Desde el entorno de Arduino se debe abrir el archivo **Marlin.ino** situado en la carpeta Marlin descargada previamente.
- 4. Una vez abierto, seleccionar la pestaña **Configuration.h**, que es donde se podrán modificar los parámetros de configuración de la impresora.
- 5. Cuando se hayan definido los parámetros se deben cargar a la placa Arduino Mega 2560 que está conectada a la RAMPS 1.4. Para ello, se conecta el Arduino al ordenador mediante USB, se selecciona el puerto de conexión y el tipo de placa ("Arduino Mega 2560") en el apartado Herramientas. Finalmente se pulsa el botón **Cargar** para cargar el código a la placa.

En el Anexo II se adjunta un informe con los principales parámetros de firmware Marlin, como son las velocidades de los motores, volumen de impresión, temperaturas, etc., así como sus valores configurados para este caso.

6. Software

6.1. Solid Edge

Para el diseño 3D de las piezas estudiadas en este trabajo se ha utilizado la versión académica V19 del programa Solid Edge, propiedad de Siemens.

Solid Edge es un programa parametrizado de diseño asistido por ordenador de piezas tridimensionales. Permite el modelado sólido de piezas de distintos materiales, doblado de chapas, ensamblaje de conjuntos de piezas, soldadura y funciones de dibujo en plano para ingenieros.

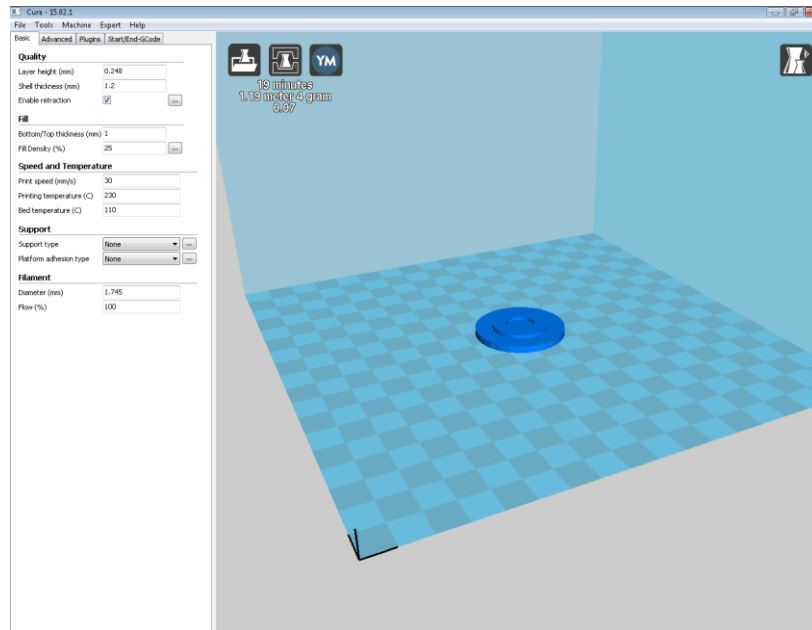


33. Entornos de Solid Edge

6.2. Cura

Como ya se ha mencionado, el programa capeador utilizado en este proyecto es Cura, desarrollado por Ultimaker. En este programa se carga el archivo CAD del diseño de la pieza en formato STL (.stl) que significa "*STereo Lithography*".

El programa analiza la pieza capa por capa, y en función de todos los parámetros que configuremos generará un archivo GCODE que es el que contiene todos los comandos a transmitir a la placa electrónica para que la impresora los ejecute.



34. Interfaz del programa Cura

6.2.1. Área de impresión

El programa dispone de una pantalla en el que se puede visualizar el área de impresión disponiendo de varios comandos para modificar la visualización de la pieza. Estos comandos son:

- **Load:** Para cargar rápidamente el modelo 3D en formato STL de la pieza que queramos imprimir. También se puede cargar desde la barra de herramientas o arrastrando el archivo al área de impresión.



35. Botón "Load"

- **Print With USB:** Inicia la conexión con la impresora y abre el panel de impresión (si la impresora no está conectada, el icono será diferente y pondrá "Save Toolpath", que guardará el proyecto en un archivo GCode imprimible desde la tarjeta SD de la impresora).



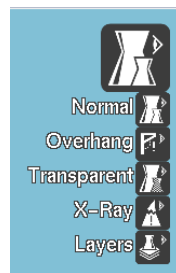
362. Botón "Print With USB"

- **Share on YouMagine:** En esta opción se pueden compartir los diseños en "YouMagine", una comunidad con un gran repositorio de diseños 3D donde usuarios de todo el mundo suben sus creaciones.



37. Botón "Share on YouMagine"

- **View Mode:** Es un icono desplegable donde se puede escoger entre 5 tipos de visualización de la pieza que se encuentre en el área de impresión:



38. Opciones de visualización ("View Mode")

- Normal: Muestra la figura como un sólido, permitiendo ver el resultado final de la pieza impresa.
 - Overhang: Muestra las zonas de la pieza que, por sus ángulos, puedan presentar problemas a la hora de imprimir.
 - Transparent: Hace que la figura sea transparente permitiendo ver a través de ella.
 - X-Ray: Permite ver a través del objeto y muestra cavidades o elementos internos.
 - Layers: Una de las visualizaciones más útiles ya que permite seleccionar y ver cada capa que se va a imprimir.
- **Opciones de transformación:** Su función es la de adaptar el modelo al área de impresión o ajustarlo al tamaño deseado:



39. Opciones de transformación

- **Rotate**: Permite girar la pieza en cualquiera de los 3 ejes.
- **Scale**: Da la posibilidad de aplicar una escala en cualquiera de los tres ejes:
- **Mirror**: Esta opción permite crear otra figura espejo de la inicial y copiarla respecto a cualquiera de los 3 ejes.

- **Tiempo de impresión, gasto de material y coste:** En función de los parámetros configurados, Cura calcula el tiempo de impresión, el gasto de material y el coste de la pieza (en €), y los muestra en el área de impresión.

19 minutes
1.19 meter 4 gram
0.07

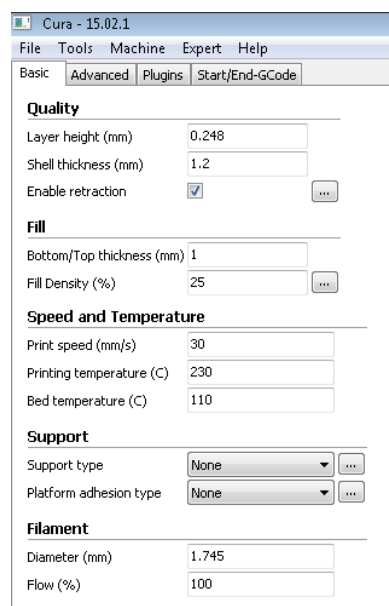
40. Tiempo de impresión, gasto de material y coste

6.2.2. Parámetros de configuración

Es importante una buena elección en los valores de los parámetros de configuración de la impresión ya que determinará, entre otras cosas, la calidad de la pieza, el tiempo de impresión, el coste y gasto de material.

A continuación se muestra una explicación detallada de los parámetros que se pueden configurar en el software Cura:

- **Basic (Configuración básica)**



41. Pestaña "Basic"

Quality (Calidad)

- **Layer height (Altura de capa):** Uno de los parámetros más importantes. Indica el grosor de las capas y está directamente ligado a la calidad de la pieza. A menor altura de capa mayor será la calidad de la pieza pero mayores serán los tiempos de impresión. Los valores recomendados están entre 0.1 y 0.3 mm.

- *Shell thickness* (Grosor del borde): Indica la anchura de las paredes del objeto y su valor deberá ser un múltiplo del diámetro de la boquilla del HotEnd, que en este caso el nozzle tiene una boquilla de 0.4 mm. Valores que dan buen resultado son los de paredes de 0.8 o 1.2 mm, por lo que el HotEnd debería dar 2 o 3 vueltas para completar la pared.

- *Enable retraction* (Habilitar retracción): Con esta opción se ordena que el extrusor retraiga un poco al plástico en los desplazamientos sin extrusión para que no gotee.

Fill (Relleno)

- *Bottom/Top thickness* (Grosor de la capa inferior y superior): Con este parámetro determinaremos el grosor de la capa inferior y superior, que serán capas macizas. Su valor deberá ser un múltiplo de la altura de capa, dando buenos resultados los valores de entre 0.6 y 1.2 mm aproximadamente.

- *Fill density* (Densidad del relleno): Es un parámetro importante que indica el porcentaje de relleno que tendrá la pieza, influyendo directamente en el tiempo de impresión, el coste del material y en la resistencia de la pieza. Un 20 % de relleno es útil para piezas que precisen de poca resistencia, aumentando dicho parámetro para piezas que tengan que soportar peso o esfuerzos. Obviamente, un valor del 100 % supone crear un objeto macizo.

Speed and Temperature (Velocidad y temperatura)

- *Print speed* (Velocidad de impresión): Es otro de los parámetros de impresión más importantes que determina los milímetros de filamento por segundo que atraviesan el extrusor. A mayor velocidad se consigue peor calidad de la pieza pero el tiempo de impresión será menor. El rango de velocidades de impresión óptimos son entre 20 y 60 mm/s.

- *Printing temperature* (Temperatura de impresión): Fija la temperatura del HotEnd a la que se va a imprimir. Se debe seleccionar en función del plástico que utilicemos, como 190 - 210 °C para el PLA o, en este caso, 220 - 240 °C para el ABS. En este caso, el ABS se ha impreso a una temperatura de 230°.

- *Bed temperatura* (Temperatura de la cama caliente): Fija la temperatura de la cama caliente y también irá en función del plástico con el que se imprima, siendo en este caso de 80 - 110 °C para el ABS. Para el PLA no sería necesario calentar la cama

aunque puede dar mejor resultado si se temple entre 30 y 60 °C. En este caso, el ABS se ha impreso con una temperatura de 110° en la cama caliente.

Support (Soporte)

Muy útil en ciertas impresiones para mejorar la adherencia de la pieza o crear elementos auxiliares de soporte para regiones de la pieza que no tengan sustento debajo de ellas.

- *Support type* (Tipo de soporte): Esta opción creará soportes donde sea necesario y permitirá modificarlos. Se emplean cuando la pieza tiene partes en el aire que no se puedan sustentar o cuando crece con un Angulo muy grande, Hay dos opciones: "Touching Buildplate" y "Everywhere": la primera crea soportes sobre la base y la segunda también los crea apoyándose en otras zonas de la pieza.

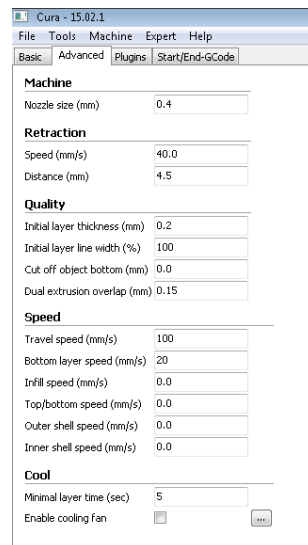
- *Platform adhesion type* (plataforma de adhesión): Con esta opción se crea una plataforma en la base para mejorar la adhesión de la pieza. Existen dos tipos de bases: "Brim" crea una especie de visera en todos los bordes de la figura, y "Raft" genera una base completa sobre la que se construye la pieza.

Filament (Filamento)

- *Diameter* (Diámetro del filamento): Parámetro para indicar el filamento que estamos usando. Los filamentos más comunes son de 3 mm y de 1.75 mm, siendo éste último el utilizado durante este proyecto.

- *Flow* (Multiplicador del flujo de filamento): Modifica la cantidad de filamento extruido, para corregir su flujo si el extrusor está mal calibrado o el filamento es de un diámetro ligeramente diferente al indicado. El valor de este parámetro suele estar entre 90 y 100 %.

- **Advanced (Configuración avanzada)**



42. Pestaña "Advanced"

Machine (Máquina)

- *Nozzle size* (Diámetro de la boquilla del HotEnd): En este parámetro se especifica el diámetro de la boquilla del HotEnd que tiene la impresora. Los más comunes son los de 0.5 mm, 0.4 mm y 0.35 mm, siendo el de 0.4 mm el disponible en este trabajo.

Retraction (Retracción)

- *Speed* (Velocidad): Velocidad a la que ocurre la retracción. Una velocidad muy elevada podría mellar el filamento y estropear la impresión. Un valor óptimo es 40 mm/s.

- *Distance* (Distancia): Indica la longitud del filamento a retraer. Da buen resultado un valor de 4.5 mm.

Quality (Calidad)

- *Initial layer thickness* (Grosor de la capa inicial): Valor del grosor de la capa inicial. Para darle el mismo valor que el resto de capas se puede asignar con un 0. Lo recomendable es valores inferiores a 0.3 mm.

- *Initial layer line with* (Ancho de línea inicial): Establece el porcentaje de ancho de línea de la primera capa. Afecta directamente al "*flow*" de la capa inicial.

- *Cut off object botton* (Corta la base del objeto): Este parámetro permite cortar la figura a la altura deseada y poder empezar la impresión a dicha altura.

Speed (Velocidad)

- *Travel Speed* (Velocidad de desplazamiento): Fija la velocidad a la que se mueve el extrusor entre dos puntos de la impresora. Los valores que funcionan bien son entre 130 - 150 mm/s.

- *Bottom layer speed* (Velocidad de la primera capa): Es un parámetro importante pues determina la velocidad de impresión de la primera capa, que influye directamente en la adherencia de la pieza sobre la base. Los valores que dan buenos resultados son en torno a 20 - 22 mm/s.

- *Infill speed* (Velocidad de relleno): Velocidad a la que se imprime el relleno de la pieza. Como referencia se puede tomar un valor a partir de 40 mm/s. Valores mayores reducirán el tiempo de impresión sin afectar considerablemente la calidad final.

- *Outer shell speed* (Velocidad de la capa externa): Velocidad de impresión de la capa exterior de la pieza, que influirá en el acabado superficial de ésta, por lo que debe ser un valor bajo, en torno a 25 mm/s.

- *Inner shell speed* (Velocidad de los bordes interiores): Velocidad de los bordes interiores de la pieza, que serán los que no se ven en la figura final. Pueden ser valores superiores al parámetro anterior, en torno a 30 mm/s, ya que no afectará en el acabado.

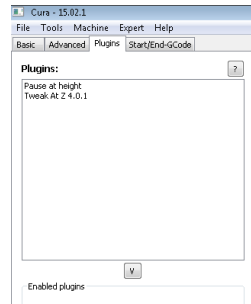
Cool

- *Minimal layer time* (Tiempo mínimo de capa): Determina el tiempo mínimo entre empezar una capa y empezar la siguiente. Este valor mínimo permitirá el enfriamiento de la capa antes de poner la siguiente y dependerá del tipo de material utilizado, siendo 10 segundos un valor aceptable.

- *Enable cooling fan* (Habilitar ventilador de capa): Esta opción habilita el ventilador de capa si la impresora cuenta con él. Dicho ventilador proporciona un enfriamiento uniforme de las capas, dando como resultado piezas con mejor acabado. La impresora utilizada en este caso no dispone de él.

• Plugins

En este apartado se pueden añadir plugins que doten al programa de funcionalidades que inicialmente no tiene. Es posible diseñarse plugins para un fin específico o descargarse plugins ya creados. Por defecto Cura trae dos instalados:



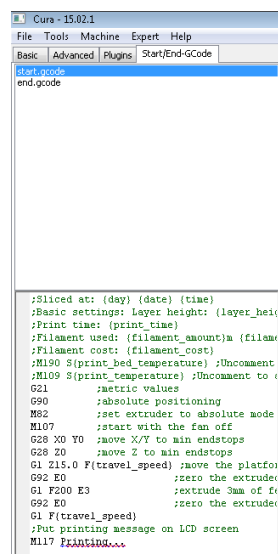
43. Pestaña "Plugins"

- *Pause at height* (Pausar a una altura): Pausa la impresión a una altura determinada.

- *Tweak at Z* (Cambio a Z): Cambia los valores de impresión fijados al llegar a una altura de impresión determinada.

• Start/End-GCode

En este apartado se pueden añadir comandos directamente al GCODE de inicio y fin de impresión.

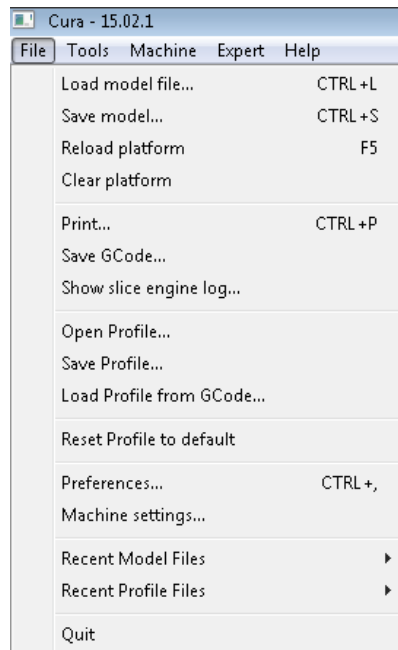


44. Start/End-GCode

- Barra de menú

Aquí se pueden encontrar diferentes pestañas desplegables con un gran número de opciones sobre información y configuración de la impresora. A continuación se detallarán las más importantes:

File



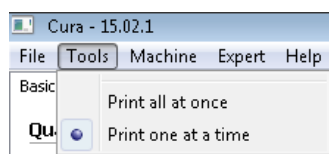
45. Pestaña "File"

- *Open profile / Save profile*: Esta opción permite guardar o cargar configuraciones de Cura.
- *Preferences* (Preferencias): Para cambiar el aspecto visual del programa.
 - *Print window* (Ventana de impresión): Permite cambiar el aspecto visual de la ventana de impresión.
 - *Colours*: Para cambiar el color del modelo 3D simulado.
 - *Filament Settings* (Ajuste del filamento): Donde se fijan parámetros del propio material como densidad y coste, y el programa pueda calcular el tiempo de impresión, gasto de material y coste de la pieza que se visualizarán en el área de impresión.
 - *Cura Settings* (Configuración de Cura): Permite habilitar la detección de la tarjeta SD, buscar actualizaciones de Cura y mandar información a Ultimaker.

- *Machine Settings* (Configuración de la máquina): Donde se configuran parámetros en función de las características físicas de la impresora utilizada.
- *E-Steps per 1mm filament*: Define los pasos que da el motor para extruir 1 milímetro de filamento. Es recomendable introducir un "0" y configurar dicho valor en el firmware.
- *Maximun width/depth/height*: Para determinar las medidas máximas del volumen de impresión.
- *Extruder count*: Indicar el número de extrusores.
- *Heated bed*: Activarla si la impresora dispone de cama caliente.
- *Machine center 0.0*: Si está habilitada, establece que el centro de la máquina es el punto 0.0. Lo normal es tenerla deshabilitada.
- *Build area shape*: Para seleccionar el tipo de área de impresión: cuadrada o circular.
- *Gcode flavor*: Para definir el tipo de máquina y firmware.
- *Printer head size*: Donde se definen las dimensiones del HotEnd y evitar así que el extrusor no golpee las piezas creadas.
- *Communication settings*: Estos parámetros establecen el puerto de conexión de la impresora y si tasa de transferencia.

Tools

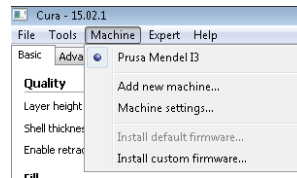
En esta pestaña aparecen dos opciones útiles cuando se van a imprimir varias piezas a la vez, donde se podrá escoger si imprimirlos todos a la vez o de uno en uno.



46. Pestaña "Tools"

Machine

Con esta pestaña se dispone de varias configuraciones preestablecidas para el caso de que se disponga de varias impresoras diferentes.

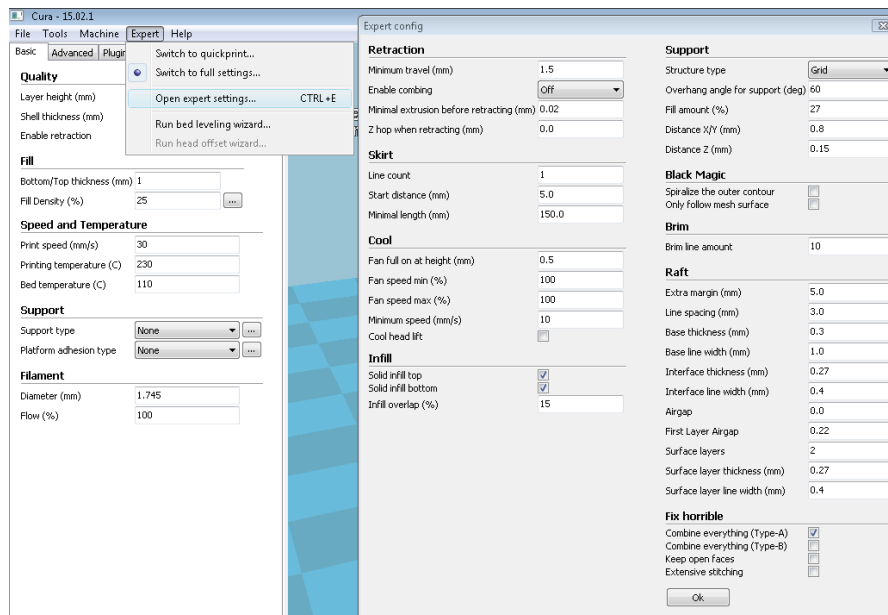


47. Pestaña "Machine"

Expert

En esta pestaña, las dos primeras opciones son para escoger una "impresión rápida" (sin apenas configuración) o una "impresión completa" (todas las opciones).

En la siguiente opción "Open Expert Settings" aparecerán parámetros de impresión más avanzados:



48. Pestaña Expert

Retraction (Retracción)

La retracción del filamento se produce al moverse el extrusor entre puntos de la máquina sin imprimir y evitar que gotee el material.

- *Minimum travel* (desplazamiento mínimo): Fija el desplazamiento mínimo en la retracción.

- *Enable combining*: Estando habilitada, el HotEnd evita pasar sobre huecos u orificios.

- *Minimal extrusion before retracting* (Mínima extrusión antes de retraerse): Cantidad mínima de material extruido antes de que se produzca la retracción.

- *Z hop when retracting* (Elevación del eje Z al retraer): Elevación del HotEnd en los desplazamientos sin impresión.

Skirt

El skirt o falda es una línea de material que rodea la figura que se está imprimiendo. Es un elemento importante ya que determina los límites del modelo y limpia la boquilla del HotEnd eliminando posibles burbujas o suciedad antes de imprimir la pieza final.

- *Line count* (Número de líneas): Número de vueltas que hará alrededor del objeto.

- *Start distance* (Distancia al objeto): Separación entre la pieza y la falda.

- *Minimal lenght* (Longitud mínima): Longitud mínima de la falda.

Cool

Contiene parámetros de configuración relativos al enfriamiento de la pieza que se imprime, modificando opciones del ventilador de capa o tiempos mínimos de impresión.

- *Fan full on at height* (Ventilador activo a cierta altura): permite activar el ventilador de capa a partir de una altura definida. Para alturas inferiores, el ventilador funcionará a una velocidad proporcional, estando apagado en la capa inicial.

- *Fan speed min/max* (Velocidad de ventilador mínima/máxima): Límites de velocidad del ventilador.

- *Minimun speed* (Velocidad mínima): Es importante fijar una velocidad mínima de impresión ya que una velocidad baja puede recalentar el plástico deformando la impresión. Normalmente habrá que fijarlo entre 10 y 15 mm/s.

- *Cool head lift* (Sube para enfriar): Con esta opción seleccionada, el HotEnd se eleva al terminar una capa si no se ha cumplido el tiempo mínimo fijado, dando tiempo a que la capa se enfríe.

Infill

- *Solid infill top/bottom* (Relleno sólido superior e inferior): Es recomendable tenerlas activadas para que las capas inferior y superior sean sólidas.

- *Infill overlap* (Solapamiento de relleno): Cantidad de relleno que se solapa con los bordes. Un 15 % de solapamiento da buen resultado.

Support

Los soportes son elementos muy importantes en ciertas impresiones debido a la geometría de la figura a imprimir. Deben poder retirarse fácilmente.

- *Structure type* (Tipo de estructura): Hay dos tipos para elegir: *Grid* (cuadrícula) y *Lines* (líneas).

- *Overhang angle for support* (Ángulo máximo para soportes): Ángulo máximo para empezar a usar los soportes, partiendo con la referencia de 0º en vertical y 90º en horizontal. Normalmente se configura a partir de 45º.

- *Fill amount* (Cantidad de relleno): Fija el relleno de los soportes, normalmente entre 20 y 50 %.

- *Distance X/Y* (Distancia X/Y): Separación horizontal entre el soporte y los bordes del objeto. Suele ser suficiente una separación de 0.7 mm.

- *Distance Z* (Distancia Z): Separación vertical entre soporte y pieza. Normalmente se fija a la mitad de la altura de capa, es decir, 0.1 o 0.15 mm.

Black Magic

- *Spiraliza the outer contour*: Esta opción imprime el contorno de la pieza con una base sólida. Convierte un elemento solido en hueco.

- *Only follow mesh surface*: Imprime la superficie del objeto, sin tener en cuenta la base, el relleno o la capa superior.

Brim

- *Brim line amount* (Ancho de la visera): Este parámetro determina el ancho de la visera, que influirá en la adhesión de la pieza, con valores comunes entre 5 y 20 mm.

Raft

En este apartado se configuran los parámetros más avanzados de la base de impresión que se comentó en la configuración básica.

- *Extra margin* (Margen extra): Margen que sobresaldrá de la base del objeto.
- *Line spacing* (Espacio entre líneas): Distancia entre líneas de la malla.
- *Base thickness* (Espesor de la base): Grosor que tendrá la base, normalmente de 1 o 2 veces la altura de capa.
- *Base line width* (Ancho de la línea de base): Grosor de las líneas que forman la base, normalmente el doble al diámetro del nozzle, es decir, dos pasadas por línea.
- *Interface thickness* (Espesor de capa intermedia): Grosor de la capa intermedia de la base.
- *Interface line width* (Espesor línea intermedia): Grosor de las líneas de la capa intermedia.
- *Airgap*: Separación vertical entre la última capa de la base y la pieza, por lo que influirá en la facilidad de retirar el objeto de la base.
- *Surface layers* (Capas de la superficie): Numero de capas de la parte superior de la base.

Fix Horrible

Este apartado contiene opciones para mejorar o reparar los objetos, alterando la interpretación del modelo 3D, y resolviendo posibles problemas a la hora de imprimir. Por defecto Cura suele reparar automáticamente los errores del modelo 3D, por lo que estas opciones solo se deben activar en casos excepcionales.

- *Combine everything (Type A)*: Une todas las partes del modelo manteniendo intactos los orificios internos.
- *Combine everything (Type B)*: Une todas las partes del modelo ignorando orificios internos y conservando la capa exterior.
- *Keep open face*: Mantiene abierto pequeños huecos del modelo, ya que Cura los interpreta como errores y los cierra automáticamente.
- *Extensive stitching*: Repara agujeros y grietas, cerrando orificios que tengan polígonos que se toquen.

Las dos últimas opciones que podemos encontrar dentro de la pestaña "Expert" son:

Run first run wizard: Con esta opción podemos ejecutar el asistente para la configuración inicial. Este asistente se ejecuta por defecto la primera vez que instalamos el programa

Run bed leveling wizard: Al pulsar esta opción, se va a ejecutar un asistente que ayuda en el proceso de nivelación de la cama.

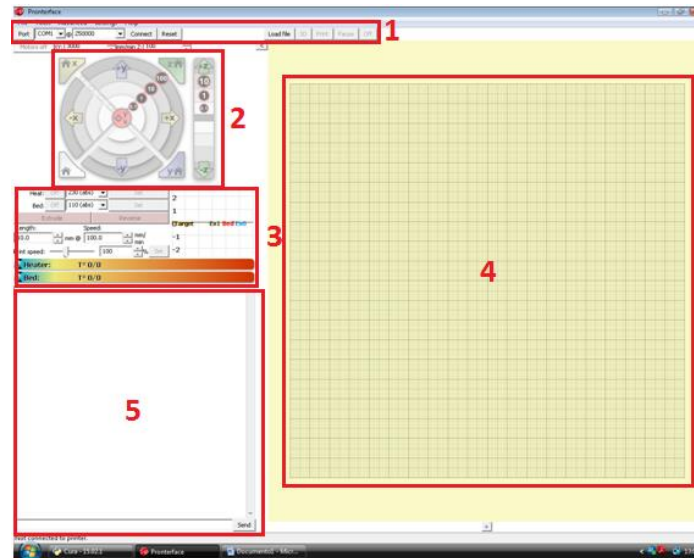
6.3. Pronterface

Como se ha mencionado, Pronterface es un programa interfaz que permite controlar la impresora 3D a través del ordenador. Es un programa antiguo de software libre, pero muy utilizado ya que es sencillo de utilizar y con el que es fácil familiarizarse debido a su interfaz gráfica, mostrando en pantalla por ejemplo, la evolución de las temperaturas o la capa que se está imprimiendo en cada momento.

Con el Pronterface se carga el archivo en formato GCODE generado anteriormente con el programa capeador (en este caso Cura) y se envía dicho archivo a la impresora.

Mediante el Pronterface se puede controlar la impresora enviando comandos simples como mover los motores o configurar temperaturas, o enviar modelos completos para comenzar la impresión en 3D. Se puede dividir la interfaz gráfica en cinco partes:

- 1 - Panel superior
- 2- Cursores de movimiento
- 3- Opciones de temperatura y extrusión
- 4 - Plato o área de impresión
- 5 - Ventana de comandos



49. Interfaz del programa Pronterface

1. Panel superior

Las opciones que aparecen aquí, de izquierda a derecha, son:

- Port: Tendremos que seleccionar el puerto USB donde está conectada la impresora. En este caso COM3.
- Velocidad de transmisión: En este caso son 250000 baudios.
- Connect: Para conectar la impresora una vez seleccionados el puerto y la velocidad de transmisión.
- Reset: Para resetear la conexión.
- Load file: Cargar el fichero GCODE de la pieza que se quiere imprimir.
- Compose: Permite unir varios archivos a la impresión.
- SD: Opción para cargar el archivo desde una tarjeta SD si se dispone de lector SD.
- Print: Botón con el que se ejecuta la orden de imprimir el archivo previamente cargado en el programa.
- Restart: Reinicia la impresión.
- Pause: Detiene la impresión cancelando en siguiente comando a ejecutar por la impresora.

- Resume: Permite continuar la impresión desde el comando en el que se ha pausado.
- Off: Para la impresión y desconecta los elementos calefactores, cama caliente y HotEnd.

2. Cursores de movimiento

En este apartado se pueden enviar comandos simples para mover los motores X, Y y Z una distancia deseada (medidas en milímetros) y seleccionar su velocidad (en mm/min).

3. Opciones de temperatura y extrusión

Aquí encontramos los botones para fijar una temperatura para el HotEnd ("*Heat*") y la cama caliente ("*Bed*"). Además se puede visualizar una gráfica donde se muestra la evolución de las temperaturas a lo largo del tiempo.

También se puede enviar un comando simple para extruir filamento seleccionando la distancia a extruir (en milímetros) y su velocidad (en mm/min), definiendo el sentido del giro en "*Extrude*" o "*Reverse*".

4. Plato o área de impresión

Muestra gráficamente el objeto a imprimir, en color rojo, e irá cambiando cada capa a color verde a medida que se va imprimiendo cada una. También se muestran en color gris las trayectorias del HotEnd en la que no se está aportando material.

5. Ventana de comandos

Es una ventana donde se muestra información de las operaciones realizadas y donde se puede introducir manualmente un comando GCode a ejecutar por el programa.

En el caso de la impresora utilizada en este proyecto, existe la alternativa de no utilizar el programa interfaz Pronterface, sino que se podría cargar el archivo GCode en una

tarjeta SD y conectarla directamente a la pantalla LCD de esta impresora (que posee dicho lector para tarjetas SD) y poder realizar la impresión 3D directamente.

7. Diseño e impresión 3D de componentes optomecánicos

Una vez montada, calibrada y configurada la impresora, el siguiente paso ha sido realizar pruebas de impresión para un ajuste óptimo y un control sobre los parámetros. Para ello, se han impreso todas las piezas de repuesto de la impresora, ya que las propias piezas originales también habían sido obtenidas por impresión 3D. Esto permite disponer de repuestos para posibles fallos en el futuro como fruto del propio uso de la impresora.

El objetivo principal del proyecto es el estudio de la aplicación de la impresión 3D en el ámbito de la optomecánica. Para ello, se diseñarán e imprimirán varios modelos que sean de utilidad en sistemas ópticos comunes o personalizados, ya que la versatilidad del diseño 3D por ordenador nos permitirá diseñar las piezas conforme a nuestras necesidades para poder realizar un ensayo óptico determinado.

Como ya se ha comentado anteriormente, la impresora que se va a utilizar para la fabricación de las piezas será la impresora 3D Power Code, y dichas piezas estarán constituidas por material polímero termoplástico, concretamente ABS de color azul.

Como referencia, se tomarán algunos modelos comerciales de empresas del sector como Thorlabs o Newport, ya que muchos de sus productos son los que hay disponibles en el laboratorio. El gran inconveniente que poseen los productos de empresas como éstas, es que dichos productos no son compatibles entre las diferentes marcas.

Para poder evaluar los resultados obtenidos, se analizarán las piezas impresas conforme a los siguientes aspectos:

- Funcionalidad:

Evidentemente, es el requisito más importante que las piezas deberán cumplir, es decir, que cumplan su función en el sistema óptico para el que han sido diseñadas.

- Calidad superficial:

El fin para el que están destinadas las piezas podrá requerir una mayor calidad de impresión u otra, por lo que se estudiará cada caso. Habrá geometrías que requerirán un mejor acabado, como puede ser el alojamiento de una lente, o geometrías cuyas

tolerancias tengan menor importancia, como piezas con un objetivo meramente estructural.

- Resistencia:

La resistencia también se valorará, especialmente en las piezas cuyo fin es el de sustentar el peso de otras piezas o elementos del sistema óptico. Para poder estimar la resistencia se harán diferentes ensayos, como el peso que pueden soportar.

- Tiempo de fabricación:

Se analizará el tiempo total necesario para obtener la pieza final o conjunto de piezas final. Para ello, se diferenciarán y estimarán los distintos tiempos que aparecen, para poder calcular finalmente el tiempo total.

- Tiempo de diseño 3D: Es el tiempo empleado en realizar cada diseño por ordenador mediante el programa Solid Edge. El tiempo dependerá de la geometría de cada pieza.
- Tiempo de impresión: Es el tiempo en el que se realiza la propia impresión. Su valor es calculado y mostrado por el programa Cura en función de la pieza y los parámetros de impresión configurados.
- Tiempo de preparación previa: En él se consideran los tiempos de calibración de la impresora (generalmente de la cama caliente), el tiempo de calentamiento de la cama caliente y el tiempo de la aplicación de laca sobre dicha cama para una correcta adherencia de la primera capa de material fundido. El tiempo de calentamiento del HotEnd no se considera ya que es un tiempo muy pequeño comparado con el calentamiento de la cama caliente, y ocurre a la vez que éste, por lo que no influye en el tiempo total. El tiempo de calibración de la cama caliente suele ser de 5 minutos y el tiempo de calentamiento de 10 minutos, que hacen un total de 15 minutos, considerando despreciable el tiempo de aplicación de la laca.
- Tiempo de preparación posterior: Este tiempo será el empleado para la preparación de la pieza posterior a la impresión. Tal preparación consiste en el lijado o pegado con acetona de las piezas, así como la eliminación del soporte construido o de gotas de material solidificadas.
- Tiempo de montaje: Es el tiempo necesario para unir las piezas y formar el conjunto para el que han sido diseñadas.

Una de las ventajas de la impresión 3D es el ahorro de tiempo al poder fabricarlas en el mismo lugar donde se van a utilizar, en este caso, un laboratorio. También se puede tener en cuenta que, en el caso de querer utilizar una pieza metálica que no se encuentre en el laboratorio, sería necesario ir a la tienda o encargarla, lo que aumentaría el tiempo necesario para poder tener disponible dicha pieza.

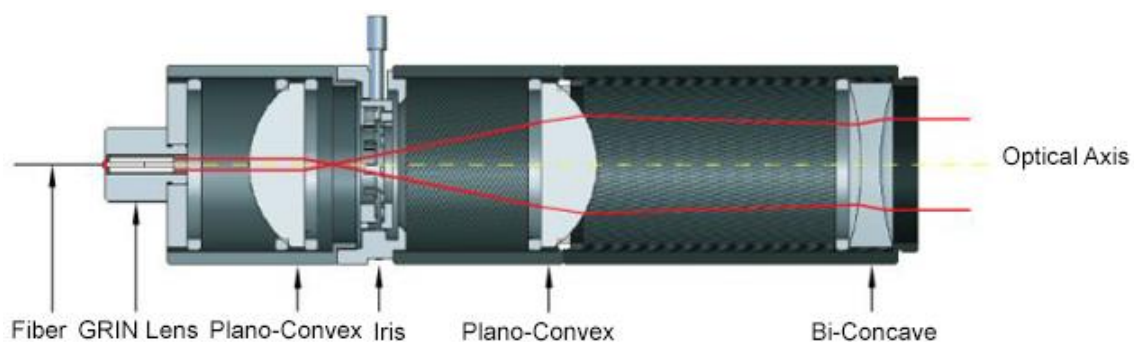
- Coste:

Otro de los aspectos más importantes a valorar que determinará si es rentable o no utilizar la impresión 3D en el ámbito de la optomecánica. El coste del material imprimible es relativamente bajo, por lo que las piezas impresas serán de bajo coste, considerando que generalmente dichas piezas no son macizas, es decir, necesitan menos material. Por el contrario, hay que tener en cuenta la inversión inicial al adquirir la impresora 3D.

Tanto el coste de la pieza como el tiempo de impresión son mostrados en el software Cura en función de los parámetros de impresión que se establezcan, y teniendo en cuenta que el material utilizado en este trabajo tiene un coste de 20 €/kg y una densidad de unos 1240 kg/m³.

7.1. Diseño 1: Sistema óptico receptor

Este sistema es muy común en optomecánica, y está compuesto por un fotodetector y una lente o filtro óptico, situados a una distancia focal. Una de las opciones más habituales para montar dicho sistema es un tubo de lente, donde el eje central del tubo es coincidente con el eje óptico.



50. Esquema de tubo de lente

Existe una gran variedad de tubos de lentes en cuanto a su forma y dimensiones, como por ejemplo, entre los más comunes están los tubos de $\varnothing 1/2"$, $\varnothing 1"$, $\varnothing 30$ mm, $\varnothing 2"$ y $\varnothing 3"$.

Además, los tubos de lentes son compatibles con una amplia gama de accesorios, como monturas ópticas y sistemas de jaulas, y permiten el montaje de complejas configuraciones ópticas y subconjuntos ópticos compactos en un tiempo de configuración mínimo.

Los tubos de lentes están roscados en su interior y dentro de ellos también se alojan anillos de retención roscados para separar sus componentes (lentes, filtros...) a la profundidad deseada.

Para este caso, el sistema óptico receptor lo he aplicado al diseño de un termómetro infrarrojo que mide la temperatura de una superficie de manera remota, basado en el Proyecto Fin de Carrera de Abraham de los Ángeles Díaz García ("*Desarrollo de un sensor de temperatura remoto basado en la radiación infrarroja*") [2]. Dicho sistema estaba compuesto por una termopila conectada a una placa, y por una lente, situados en el interior de un tubo de lente y fijados a la distancia focal por al menos tres arandelas roscadas.

7.1.1. Planteamiento del problema

El primer caso que se plantea será la impresión de un tubo de lente, tomando como referencia el modelo SM1L20 de la gama SM1 del fabricante *Thorlabs, Inc.*

En el nombre del modelo, el número 1 hace referencia al diámetro interior del tubo que es 1 pulgada (25.4 mm) y el 20 significa la longitud del tubo que son 2.0 pulgadas.

Dicho cilindro está fabricado en aluminio y puede estar acoplado a una base plana cuadrada del mismo material y fabricante (aunque ya descatalogada), como puede observarse en la siguiente imagen:



51. Tubo de lente SL1L20 de Thorlabs

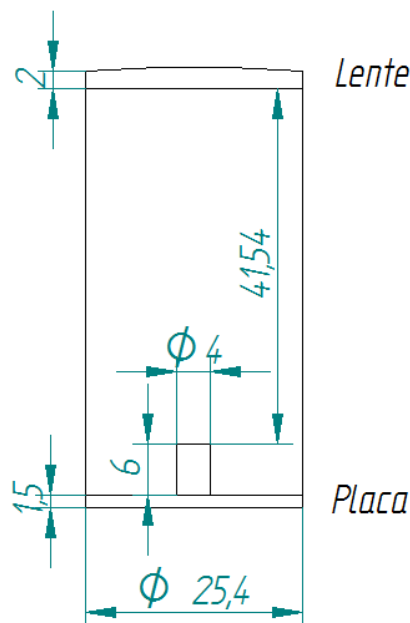
En el Anexo III se adjunta un plano detallado del tubo de referencia.

7.1.2. Solución adoptada

- **Diseño 3D:**

El primer paso será el diseño del modelo 3D por ordenador mediante el programa Solid Edge ya mencionado, con el que se generan los archivos STL para poder seguir posteriormente con el programa capeador y la configuración de los parámetros de impresión.

El requisito fundamental para hacer un diseño válido será conseguir que la lente y la termopila de la placa estén a una distancia focal óptima, que es 41.54 mm, obtenida en el proyecto de referencia antes mencionado [2]. En base a esto y a las medidas de la lente y la placa se comienza con el diseño 3D asistido por ordenador.



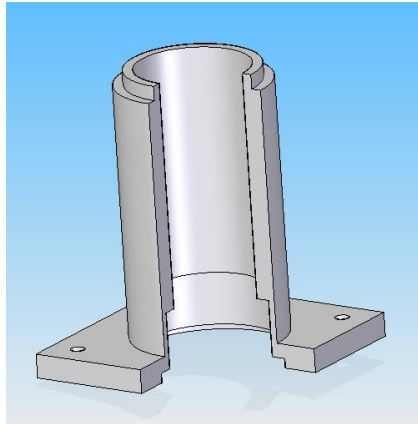
52. Distancia focal óptima

Por tanto, el diseño final constará de tres piezas que son:

- **Tubo:** Es un cilindro en el que se situarán tanto la lente como la placa en unos alojamientos a una distancia entre ellos que permiten la distancia focal óptima entre estos elementos. A diferencia del tubo de lente de Thorlabs, no va roscado en su interior, pues la distancia a la que se insertarán los elementos va fijada en el diseño y no se podrá modificar.

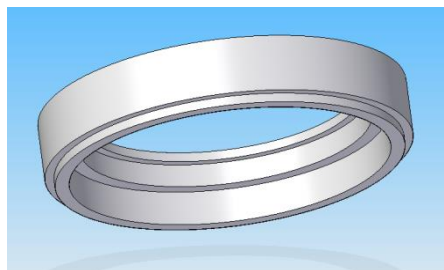
Se ha tenido en cuenta el tamaño de los conectores de la placa a la hora de hacer la profundidad del tubo, para que dichos conectores no sobresalgan permitiendo al tubo apoyarse completamente sobre su base.

También se incorporan cuatro agujeros de diámetro de 3 milímetros para permitir la fijación mediante tornillos del tubo al sistema óptico.



53. Diseño 3D del tubo

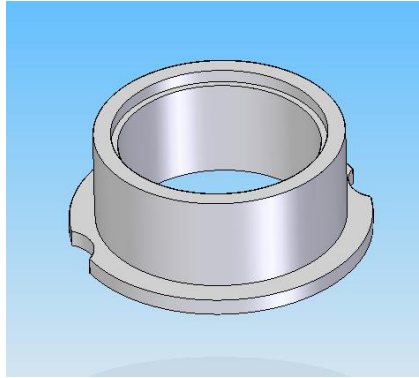
- Tapa superior: Es la encargada de retener la lente en su posición. Esta pieza encaja en la parte superior del tubo y su agujero central es el mayor posible para permitir un campo de visión mayor. También se ha incorporado un pequeño resalte para facilitar su extracción del tubo sin dañar a la lente.



54. Diseño 3D de la tapa superior

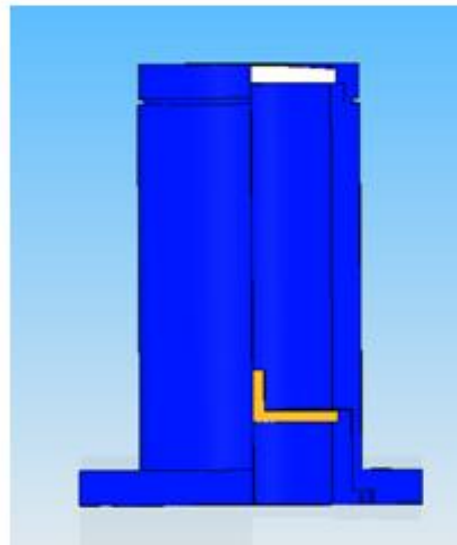
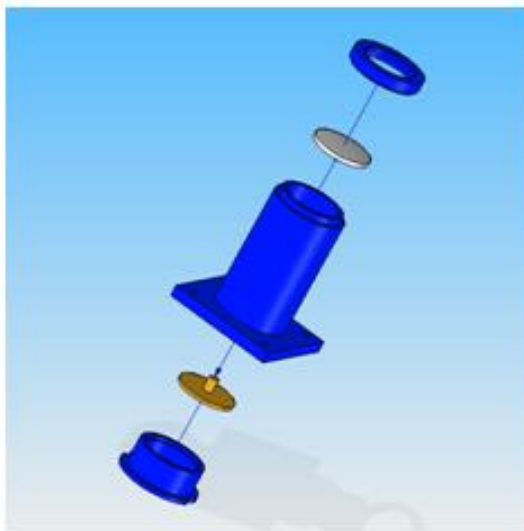
- Tapa inferior: La función de esta tercera y última pieza es la de acoplarse en la parte inferior del cilindro, permitiendo la fijación de la placa sobre su alojamiento dentro del tubo. Esta tapa también dispone de un agujero circular lo suficientemente grande para permitir el paso de los conectores de la placa y de sus cables. La altura de

esta tapa se debe a la longitud de los conectores de la placa, para evitar que sobresalgan del conjunto cuando la placa esté montada.



55. Diseño 3D de la tapa inferior

En las siguientes imágenes se puede apreciar mejor el conjunto, donde la figura plateada representa la lente, la pieza dorada representa la placa con la termopila y en azul se muestran las piezas a imprimir.



56. Vista del conjunto explosionado (izq.) y con corte a 1/4 (dcha.)

En el Anexo III de esta memoria se adjuntan los planos acotados de las tres piezas, así como un plano explosionado del conjunto.

- **Configuración de la impresión 3D:**

El siguiente paso se realiza, como ya se ha comentado, con el programa capeador Cura. Con él se definen los parámetros de impresión ya explicados con anterioridad, variando en función de las piezas y de los requisitos que necesitemos.

Para ello, se carga el archivo STL generado en Solid Edge y una vez abierto, se establecen los valores de los parámetros. La configuración básica determinada para estas piezas es:

Parámetro	Cilindro	Tapa superior	Tapa inferior
<i>Layer height (mm)</i>	0.3	0.2	0.2
<i>Shell thickness (mm)</i>	1.2	1.2	1.2
<i>Bottom/Top thickness (mm)</i>	1	1	1
<i>Fill density (%)</i>	20	20	20
<i>Print speed (mm/s)</i>	60	60	60
<i>Printing Temperature (°C)</i>	230	230	230
<i>Bed temperature (°C)</i>	110	110	110

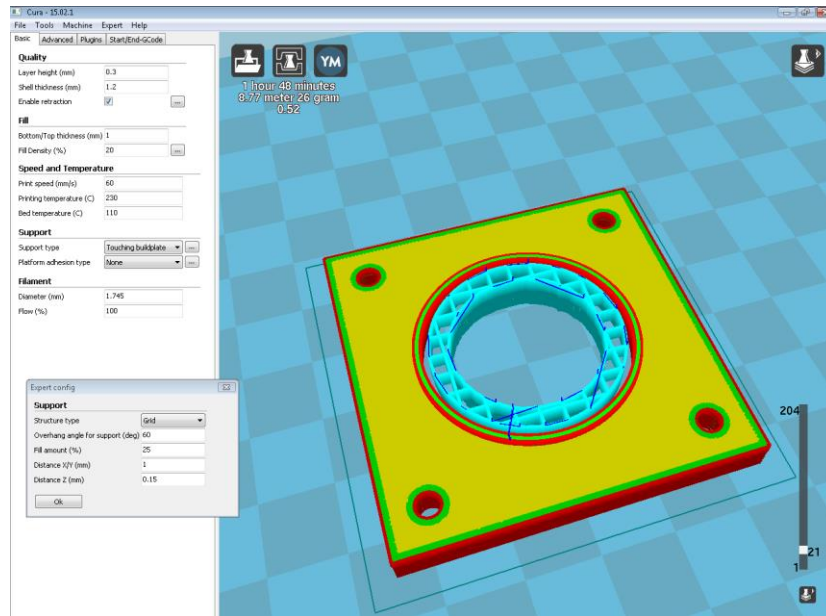
Tabla 4. Parámetros de impresión del Diseño 1

La velocidad de impresión se ha configurado con un valor alto, ya que no son geometrías muy estrechas ni complejas, por lo que se podía aumentar la velocidad de impresión, disminuyendo el tiempo de impresión.

En el caso del tubo, ha sido necesario imprimirlo con ayuda de un soporte (en este caso, tipo "Touching Buildplate") debido a que la zona del alojamiento de la placa en el cilindro se imprimiría al aire respecto a la base y provocaría grandes problemas en la impresión. Este soporte se imprime a la vez que el cilindro y con el mismo material para dar apoyo en dicha zona problemática. A continuación se muestra la configuración de dicho soporte junto a una imagen, en la que aparece el soporte en color azul.

Support	Touching Buildplate
Structure type	Grid
Overhang angle for support (degrees)	60
Fill amount (%)	25
Distance X/Y (mm)	1.0
Distance Z (mm)	0.15

Tabla 5. Configuración del soporte del tubo



57. Configuración del soporte del tubo

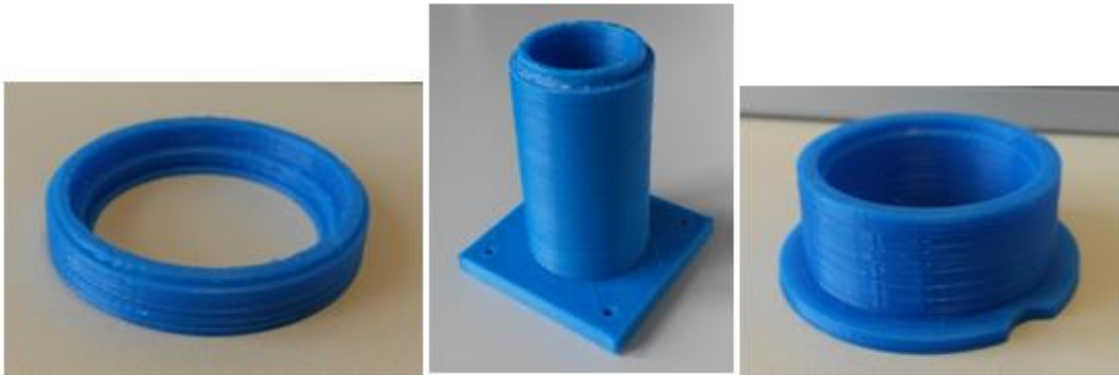
Una vez configurados los parámetros, se genera el archivo GCode para poder realizar la impresión.

- **Impresión 3D:**

Se carga el archivo GCode en el programa Pronterface, como ya se ha comentado previamente, y lo único que hay que hacer es seleccionar el puerto de entrada USB al que está conectada la impresora, seleccionar la velocidad de transmisión (250000 baudios), conectarse a la impresora ("Connect") y comenzar la impresión ("Print").

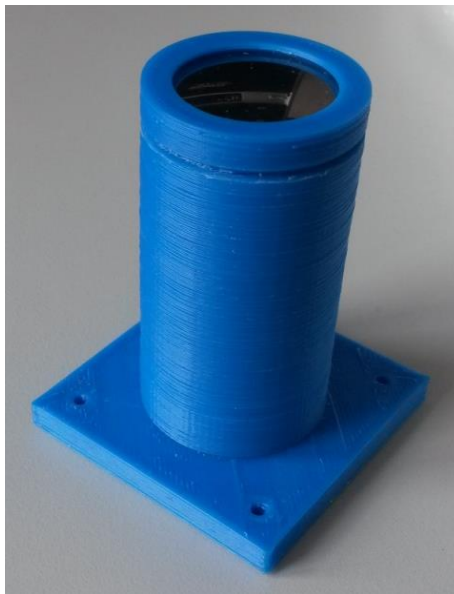
Una vez finalizado el proceso de impresión y esperando unos minutos durante el enfriamiento de la impresora y de las piezas, éstas se pueden extraer de la cama caliente.

Posteriormente, ha sido necesario lijar ligeramente las piezas para un mejor acabado, con especial atención en el cilindro ya que se tenían que retirar los restos de soporte construido.



58. De izquierda a derecha: Tapa superior, tubo y tapa inferior

Finalmente se monta el conjunto junto con la lente y la placa, como se observa en la siguiente imagen, y se evalúa el resultado final del diseño.



59. Diseño 1 montado

7.1.3. Conclusiones

Evaluamos el conjunto final obtenido atendiendo a los factores comentados anteriormente:

- Funcionalidad:

El conjunto permite un correcto funcionamiento del ensayo de infrarrojos sobre la lente para la que ha sido diseñada, por lo que no se podrá aplicar para otro ensayo diferente.

- Calidad superficial:

El acabado superficial de las piezas es bastante bueno, permitiendo que con un simple lijado puedan acoplarse entre ellas perfectamente. En las zonas críticas de los cilindros, que eran las que requerían de un soporte de impresión, ha sido necesario un mayor tiempo de lijado ya que se tenían que retirar los restos del soporte y dejar un buen acabado en los acoplamientos de la lente y la placa para que éstas encajen perfectamente.

- Resistencia:

La resistencia no era un factor crítico por la función que van a desempeñar las piezas, por lo que la impresión con un relleno del 20 % les ha proporcionado resistencia más que suficiente.

- Tiempo de fabricación:

El tiempo de impresión viene mostrado por el software Cura en función de los parámetros configurados. También hay que tener en cuenta los tiempos de diseño, preparación previa, posterior (lijado) y montaje del conjunto.

Tiempo	Cilindro	Tapa superior	Tapa inferior	TOTAL
Diseño 3D	30	10	15	55
Impresión (min)	112	12	26	150
Preparación previa (min)	15	-	-	15
Prep. posterior (min)	17	4	4	25
Montaje (min)		3		3
				248 min

Tabla 7. Tiempos de fabricación del Diseño 1

El tiempo de preparación previa solo ha de tenerse en cuenta una vez en el caso de que todas las piezas se impriman secuencialmente, es decir, comenzar a imprimir una pieza según se retire la pieza anterior.

- **Coste:**

El gasto de material y el coste de cada pieza también se visualizan en el programa Cura. Teniendo en cuenta que el material es ABS, con una densidad aproximada de 1240 kg/m^3 y con un coste de 20 €/kg, el gasto de material y coste de las piezas es:

	Cilindro	Tapa superior	Tapa inferior	TOTAL
Filamento extruido (m)	8.79	0.59	1.46	10.84
Peso (g)	26	2	4	32
Coste (€)	0.52	0.03	0.09	0.64

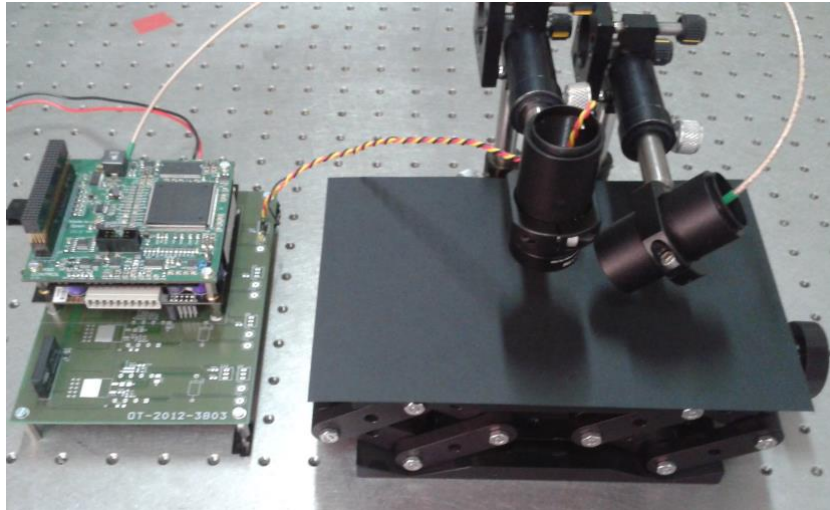
Tabla 8. Gastos de material y costes del Diseño 1

Comparando el coste total del conjunto con las piezas comerciales de Thorlabs tomadas de referencia, que son de 14,85 € para el tubo SM1L20, y unos 16,54 € para la base (modelo SM1F1, que es similar ya que el tomado de referencia esta descatalogado), es evidente concluir que coste de las piezas impresas es considerablemente inferior, es decir, es rentable obtener dichas piezas mediante impresión 3D.

7.2. Diseño 2: Par emisor - receptor

El siguiente caso se basa en un par emisor - receptor, que es un sistema óptico remoto en el que se dispone de un emisor y un receptor, similares al Diseño 1, pero que incluye el alineamiento de su eje óptico. El emisor puede ser un led o un diodo láser, mientras que el receptor está compuesto por un fotodetector y una lente o filtro óptico.

Unos ejemplos de este sistema, y que se han tomado de referencia, son un par emisor - receptor para un sistema óptico remoto de espectroscopia [3] y de salinidad [4].



60. Par emisor . receptor

7.2.1. Planteamiento del problema

El siguiente caso planteado será el diseño e impresión de un soporte en el que se puedan sujetar dos tubos de lentes, y que sea capaz de variar el ángulo y mantenerlo fijo en una posición.

Como referencia se pueden tomar la imagen anterior, para posteriormente comparar el soporte impreso con un conjunto similar compuesto por piezas de Thorlabs como:

- Dos monturas de los tubos, que son el modelo SM1RC
- Cuatro postes de $\varnothing 1/2"$, modelo TR3V
- Dos uniones de postes a 90°, modelo RA180.

7.2.2. Solución adoptada

- **Diseño 3D:**

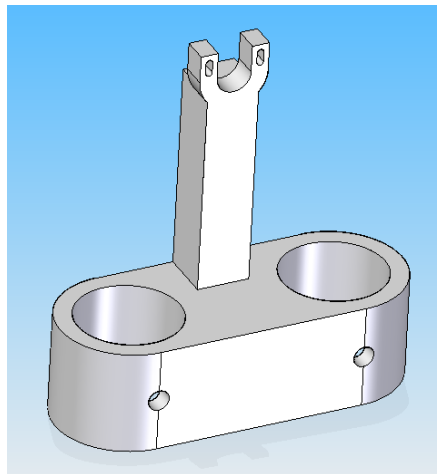
Se comienza con el diseño asistido por ordenador para determinar la geometría del soporte. Serán necesarias varias piezas para conformar el soporte, que se requerirán para fijar y dar giro a los elementos. Al finalizar los diseños, se generan los archivos STL para poder configurar la impresión.

Los requisitos fundamentales que se han tenido en cuenta para diseñar el conjunto de piezas han sido:

- Diámetro de los tubos de lentes que va a sostener el soporte, que son de $\varnothing 30$ mm.
- Diámetro de una varilla vertical sobre la que se fijará el conjunto, de $\varnothing 10$ mm.

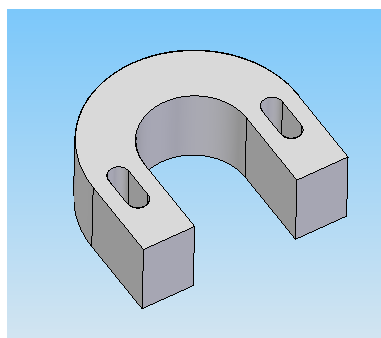
Teniendo en cuenta estas condiciones, se ha elaborado el diseño de cinco tipos distintos de piezas:

- Plataforma: Es la pieza más robusta del conjunto y es fija. Se sujeta a la varilla vertical a la altura requerida para el ensayo y sobre esta pieza se disponen los brazos que sostendrán los tubos de lentes. Esta pieza incorpora dos agujeros para los brazos que contienen los tubos de lentes y se fija la posición mediante tuercas y tornillos de métrica 6.



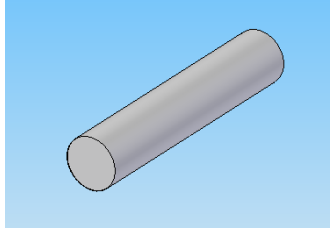
61. Diseño 3D de la plataforma

- Sujeción: Es la pieza más pequeña, que sirve para acoplarse con la plataforma mediante tuercas y tornillos de M2 para poder fijarse a la varilla vertical a la altura que se desee.



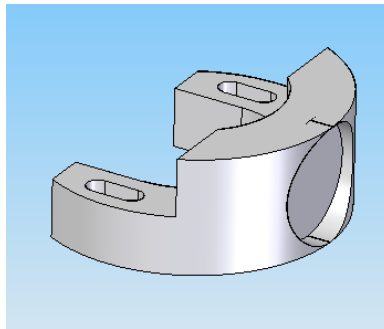
62. Diseño 3D de la sujeción

- Brazo: Habrá dos de ellos, y son los cilindros que se introducen en la plataforma y se pueden girar respecto de su eje longitudinal para obtener el ángulo deseado. Sobre ellos fijan las monturas que sujetarán los tubos.



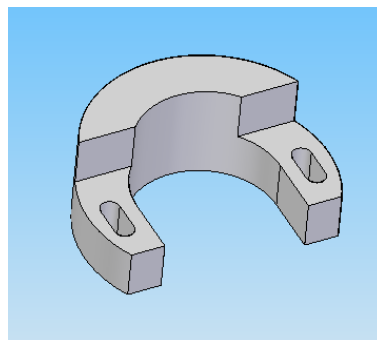
63. Diseño 3D del brazo

- Montura Tipo A: Esta es la pieza que va situada (encajada y pegada) en el brazo y su función es, junto con la siguiente pieza, la de sujetar el tubo de lente para que éste pueda girar solidario a la pieza obteniendo el ángulo requerido. Esta pieza disponer de un alojamiento para el cilindro donde encaja y se pegará con acetona.



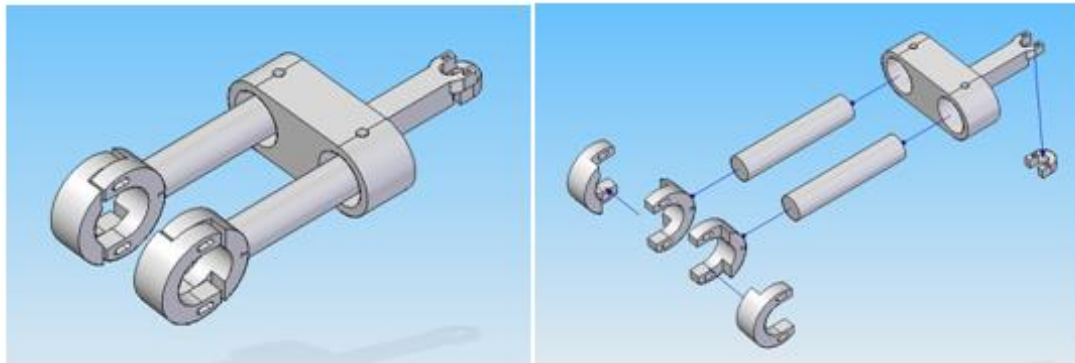
64. Diseño 3D de la montura Tipo A

- Montura Tipo B: Esta última pieza encaja sobre la anterior y se fijan mediante tuercas y tornillos de métrica 4. Es exactamente igual a la anterior salvo que ésta no dispone del alojamiento para el brazo. Se tendrán dos copias de cada una de las tres últimas piezas en el conjunto.



65. Diseño 3D de la montura Tipo B

Para entender mejor el diseño, a continuación se muestra una imagen del conjunto final junto a una vista explosionada:



66. Diseño 3D del conjunto 2 (izq.) y vista explosionada (dcha.)

En el Anexo III se adjuntan los planos de las piezas y una vista explosionada del conjunto.

- **Configuración de la impresión 3D:**

En el siguiente paso se carga el archivo STL generado y se establecen los parámetros de impresión de cada pieza.

Parámetro	Plataforma	Sujeción	Brazo	Montura Tipo A	Montura Tipo B
<i>Layer height (mm)</i>	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3
<i>Shell thickness (mm)</i>	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2
<i>Bottom/Top thickness (mm)</i>	1	1	1	1	1
<i>Fill density (%)</i>	20	20	0	20	20
<i>Print speed (mm/s)</i>	60	60	60	60	60
<i>Printing Temperature (°C)</i>	230	230	230	230	230
<i>Bed temperature (°C)</i>	110	110	110	110	110

Tabla 9. Parámetros de impresión del Diseño 2

Se han escogido velocidades de impresión altas y alturas de capa grandes para reducir los tiempos de impresión. Aunque se redujese ligeramente el acabado superficial, en la finalidad de las piezas no prevalece su calidad superficial sino su resistencia estructural.

Los brazos cilíndricos se han impreso con un relleno del 0%, es decir, son cilindros huecos. El motivo es el ahorro del material cumpliendo con las solicitaciones mecánicas y esfuerzos a los que serán sometidos.

Configurados estos parámetros, a continuación se generan los archivos Gcode.

- **Impresión 3D:**

De nuevo, las impresiones se comienzan cargando el GCode en el programa Pronterface y estableciendo la conexión con la impresora.

Finalizada la impresión de cada pieza, el lijado posterior ha sido mínimo. Solo se requería eliminar un pequeño exceso de material en las curvas interiores donde se alojaran tanto los tubos como la varilla vertical.



67. Piezas del Diseño 2 de izq. a dcha.: sujeción, plataforma, montura Tipo A y B

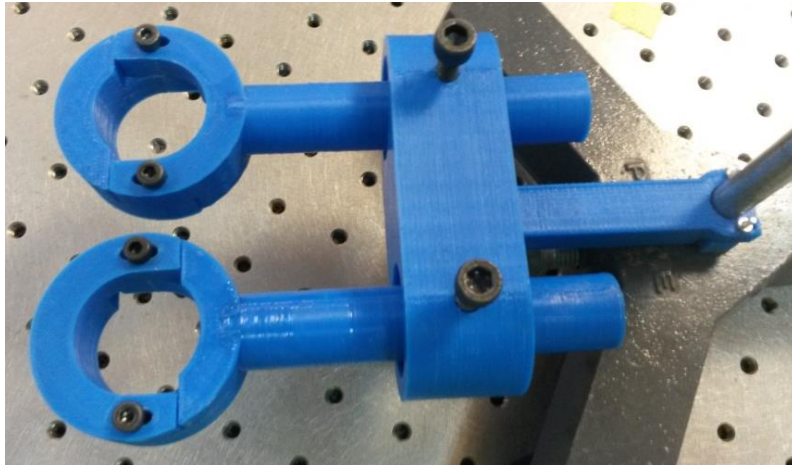
Solo se han tenido que lijar algún pequeño exceso de material en las caras interiores de las abrazaderas (donde irán los tubos) y de la sujeción (donde irá la varilla).

Los dos brazos se han tenido que pegar a las dos monturas Tipo A en el alojamiento destinado a ello. El pegado se ha realizado con acetona, ya que es un disolvente que funde el plástico ABS rápidamente.



68. Unión entre el brazo y la montura Tipo A

Con las piezas ya preparadas, se ha procedido al montaje del conjunto utilizando tornillos y tuercas de métrica 6 para la fijación de los brazos a la plataforma, de métrica 3 para la fijación entre las monturas Tipo A y B que sujetan los tubos, y de métrica 2 para la fijación entre la sujeción a la plataforma, que se sujetan a la varilla.



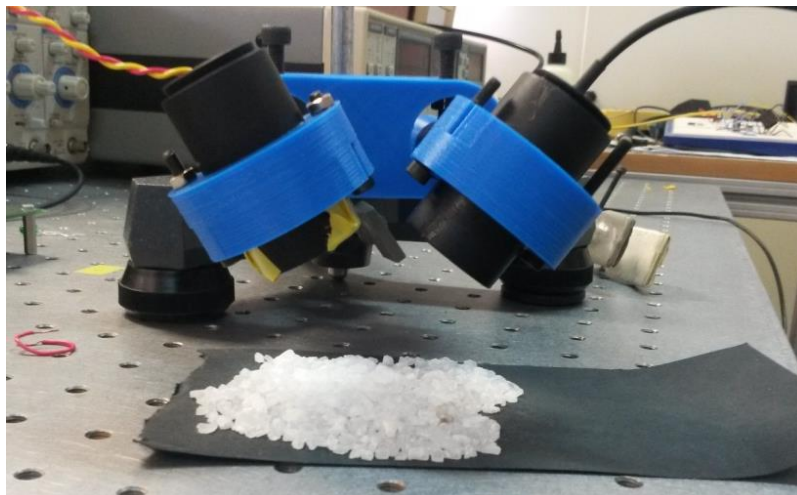
69. Diseño 2 montado

7.2.3. Conclusiones

Por último, ya se puede evaluar el conjunto de piezas obtenido atendiendo a los siguientes aspectos:

- Funcionalidad:

Con este soporte ya es posible realizar el ensayo deseado, ya que el soporte sostiene a los tubos de lente, y permite variar el ángulo que forman.



70. Ensayo

- Calidad superficial:

El acabado superficial de las piezas no era un factor determinante para el conjunto final. Es por ello que se han impreso con grandes alturas de capa (0.3 mm) y a altas velocidades (60 mm/s). A pesar de ello, la calidad de las piezas es alta.

- Resistencia:

La resistencia del conjunto sí tiene su importancia debido a que su función es la de soportar el peso de otros elementos sin comprometer su integridad estructural y sin que existan holguras entre todas las diferentes piezas y elementos.

Se podría mejorar el sistema de fijación del conjunto a la varilla, que se realiza con piezas pequeñas. Para ello, se podría aumentar el tamaño de dichas piezas para conseguir una mayor superficie en contacto con la varilla, lo cual haría más efectiva la sujeción reduciéndose las holguras.

- Tiempo de fabricación:

El tiempo de impresión de cada pieza es calculado directamente por el software Cura en función de los parámetros de impresión establecidos. En la siguiente tabla se muestran desglosados los tiempos de fabricación de cada una de las piezas impresas:

Tiempo	Plataforma	Sujeción	Brazo	Montura tipo A	Montura tipo B	TOTAL
Diseño 3D	20	4	1	15	2	42
Impresión (min)	141	5	36	34	32	248
Prep. previa (min)	15	-	-	-	-	15
P. posterior (min)	0	1	0	1	1	3
Montaje (min)			12			12
						320 min

Tabla 10. Tiempos de fabricación del diseño 2

El tiempo de preparación previa solo ha de tenerse en cuenta una vez en el caso de que todas las piezas se impriman secuencialmente, es decir, comenzar a imprimir una pieza según se retire la pieza anterior.

El tiempo de montaje incluye el pegado de la montura A al brazo, la unión de las piezas del conjunto con sus correspondientes tuercas y tornillos, y su instalación en la varilla con los tubos incorporados.

- Coste:

El gasto de material y coste unitario de las piezas se obtiene a través del programa Cura, estimando una densidad de 1240g/cm^3 y un coste de la bobina de un 1kg de 20 €.

	Plataforma	Sujeción	Brazo	Montura Tipo A	Montura Tipo B	TOTAL
Filamento extruido (m)	12.41	0.39	3.20	2.90	2.71	21.61
Peso (g)	37	1	9	8	8	63
Coste (€)	0.74	0.02	0.19	0.17	0.16	1.28

Tabla 11. Gastos de material y coste del Diseño 2

El coste total de material de todo el conjunto ha sido de 1,27 €, es decir, asequible y viable económicamente, debido al elevado coste de las numerosas piezas de Thorlabs que serían necesarias para realizar dicho ensayo.

7.3. Unión de postes con ángulo variable

Los postes son la manera más sencilla de montar componentes ópticos, e instalados mediante rosca sobre una mesa óptica ofrecen libertad de posicionamiento de la óptica en altura.

Estos postes son barras de acero inoxidable y existe una gran variedad de modelos en función de su diámetro, su longitud y del tipo de rosca que incorporen. Los más comunes son diámetros de $\varnothing 1"$, $\varnothing 1/2"$ y 25 mm con roscas M4, M6 o $1/4"$.

Existen multitud de accesorios compatibles con los postes, como pueden ser abrazaderas, bases o pedestales, que combinándose entre sí y con otros dispositivos, se puede montar un sistema óptico complejo para realizar un ensayo determinado.

7.3.1. Planteamiento del problema

El objetivo de este tercer diseño es el desarrollo e impresión de un sistema unión entre dos postes y la posibilidad de variar el ángulo entre ellos para poder realizar ensayos ópticos con diferentes configuraciones.

Como referencia se han tomado dos productos comerciales, que son el modelo *SWC* de la empresa *Thorlabs*, y el modelo *CA-2* de la empresa *Newport Corporation*, éste último era el disponible en el laboratorio y por tanto, con el que se podía comparar físicamente. Ambos productos permiten ajustar el ángulo entre postes de diámetro de 1/2", debido a su rotación continua de 360°. Están fabricados con aluminio anodizado con un peso total de unos 50 gramos para el modelo de Thorlabs y 40 gramos el modelo de Newport. Estos sistemas realizan la fijación de los postes y el bloqueo del movimiento mediante tornillos.



71. Modelo SWC de Thorlabs (izq.) y CA-2 de Newport (dcha.)

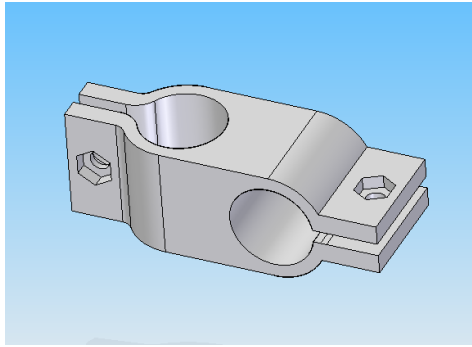
En el Anexo III se adjunta un plano detallado de los modelos de referencia.

7.3.2. Solución adoptada

- **Diseño 3D:**

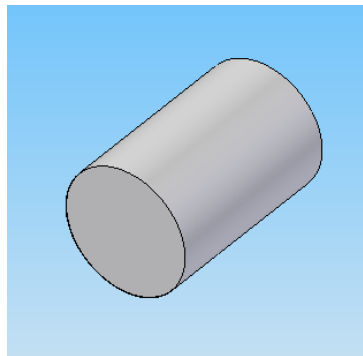
Para el diseño por ordenador con Solid Edge, se ha tenido en cuenta principalmente el tipo de poste para el que estarán destinadas las piezas, que serán de 1/2" de diámetro. Este diseño consta de tres piezas:

- **Abrazadera fija o principal:** Es la encargada de sujetarse sobre el poste vertical fijo mediante un sistema de tornillo y tuerca hexagonal M3, cuyos agujeros van incluidos en el diseño de la pieza. Dispone del agujero donde se aloja el pasador que realizara el movimiento dentro de dicho agujero, y el cual se fija mediante el mismo sistema.



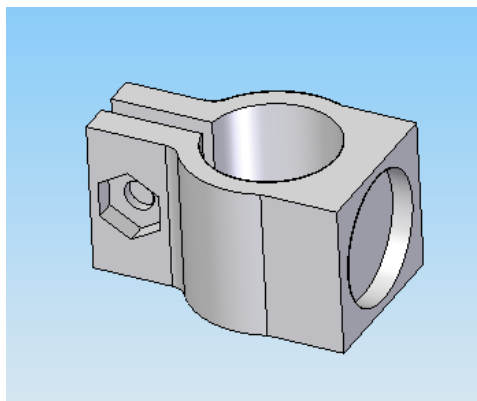
72. Diseño 3D de la abrazadera fija

- Pasador: Es el elemento que permite la rotación. Se trata de un cilindro que se sitúa en un agujero de la abrazadera fija y está encajado y pegado a la abrazadera móvil para posibilitar el giro solidario a ésta.



73. Diseño 3D del pasador

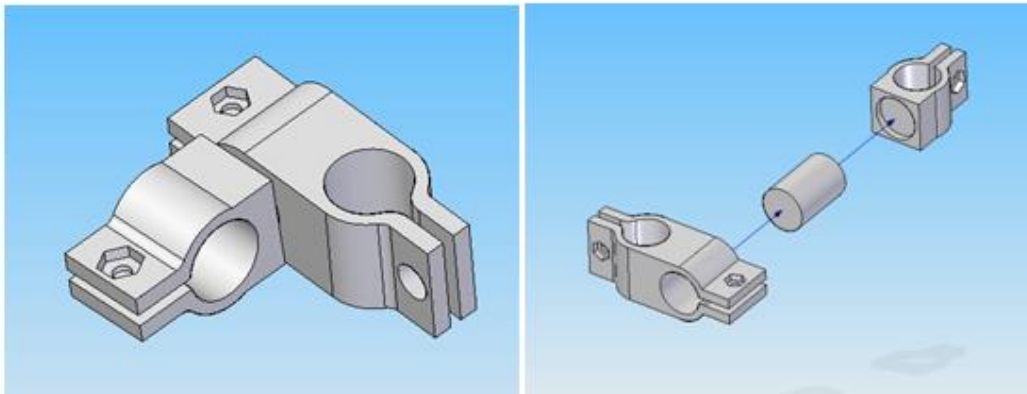
- Abrazadera móvil o secundaria: Esta unida al pasador y en su agujero se introduce el poste que se moverá para obtener el ángulo requerido en cada momento. El sistema de fijación a dicho poste es el mismo que en la otra abrazadera, disponiendo de los alojamientos para tuerca y tornillo de métrica 3. Dispone también de un agujero donde encaja el pasador, y en el que se pegará utilizando acetona.



74. Diseño 3D de la abrazadera móvil

En el caso de querer formar un ángulo entre postes de 90º, solo sería necesario utilizar la abrazadera fija ya que sus agujeros forman dicho ángulo y ambos tienen el mismo diámetro de 1/2". Es la razón de haber diseñado el pasador y su agujero con ese mismo diámetro.

A continuación se muestran unas imágenes del conjunto para entenderlo mejor. La primera muestra el conjunto compacto en una de sus posibles posiciones; mientras que la segunda es una vista explosionada del conjunto.



75. Diseño 3D del conjunto 3 (izq.) y vista explosionada (dcha.)

En el Anexo III de esta memoria se adjuntan los planos acotados de las tres piezas, así como un plano explosionado del conjunto.

- **Configuración de la impresión 3D:**

En el programa Cura se carga el fichero STL de cada pieza generada con el programa de diseño 3D. Ahora se establecen los parámetros de impresión básicos, que para estas piezas serán:

Parámetro	Abrazadera fija	Abrazadera móvil	Pasador
<i>Layer height (mm)</i>	0.248	0.2	0.3
<i>Shell thickness (mm)</i>	1.2	1.2	1.2
<i>Bottom/Top thickness (mm)</i>	1	1	1
<i>Fill density (%)</i>	25	25	20
<i>Print speed (mm/s)</i>	30	50	60
<i>Printing Temperature (°C)</i>	230	230	230
<i>Bed temperature (°C)</i>	110	110	110

Tabla 12. Parámetros de impresión del Diseño 3

La velocidad de impresión de la abrazadera fija se ha tenido que reducir debido a su complicada geometría. Se ha buscado una altura de capa intermedia para no aumentar demasiado el tiempo de impresión sin que afectase demasiado a su calidad final. La densidad de relleno se ha fijado en 25 % tanto en la abrazadera fija como en la móvil debido a que tendrán que soportar esfuerzos sobre el poste y del sistema de apriete.

En la abrazadera móvil se ha podido aumentar la velocidad de impresión con una altura de capa menor, debido a la geometría y posición de la pieza para imprimir. Dicha posición es tal que la abrazadera se apoya sobre una de sus caras de forma que el agujero para el poste se imprima de forma vertical.

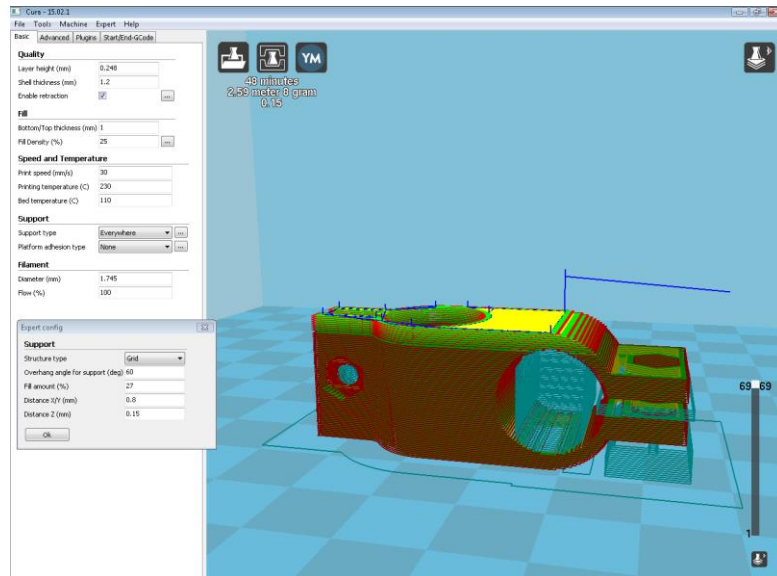
En el caso del pasador, al ser una geometría muy sencilla, era admisible imprimirlo con una altura de capa grande y a alta velocidad.

Para configurar la impresión de la abrazadera principal, ha sido necesario utilizar un soporte debido a su geometría compleja, ya que apoyando la pieza sobre una de sus caras, siempre iba a quedar imprimiéndose al aire una de las caras donde se alojará el tornillo. También presentaba problemas la cara superior a ésta y el agujero que se imprime en horizontal. Por todo ello, el tipo de soporte utilizado es "Everywhere", configurado de la siguiente manera:

Support	Everywhere
Structure type	Grid
Overhang angle for support (degrees)	60
Fill amount (%)	27
Distance X/Y (mm)	0.8
Distance Z (mm)	0.15

Tabla 13. Configuración del soporte de la abrazadera fija

En la siguiente imagen se puede apreciar en color azul el soporte construido:



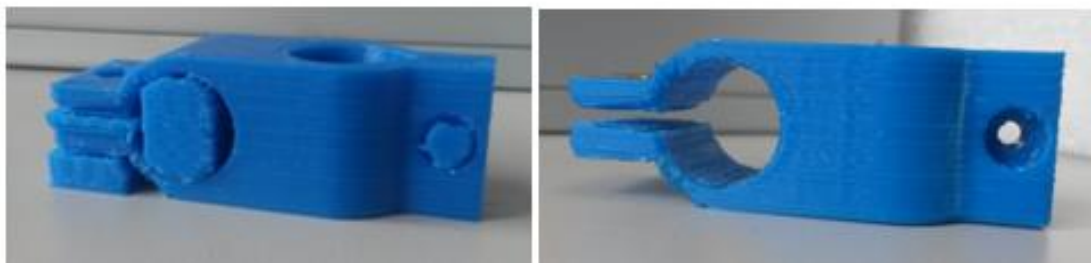
76. Configuración del soporte de la abrazadera fija

Una vez configurados los parámetros, se genera el archivo GCode para poder realizar la impresión.

- **Impresión 3D:**

Se carga el archivo GCode en el Pronterface y posteriormente, se comienza la impresión.

Una vez impresas, se dejan enfriar y se procede a realizar el tratamiento posterior. En el caso de la abrazadera fija se retira todo el soporte construido y se lijan los restos de dicho soporte en contacto con la pieza.



77. Abrazadera fija con soporte (izq.) y sin soporte (dcha.)

En el pasador y la abrazadera móvil no ha sido necesario el lijado, pero si se han encajado y pegado entre sí mediante acetona, ya que el plástico ABS se deshace con este disolvente y permite un rápido y eficaz pegado.



78. Unión de la abrazadera móvil al pasador

Para permitir un apriete más cómodo y seguro, en el diseño de las abrazaderas se incorporaron unos alojamientos para las tuercas. Para fijar éstas en su alojamiento, se ha utilizado un soldador para calentar la tuerca e introducirla en la ranura cuando el plástico comenzase a derretirse o reblandecerse.



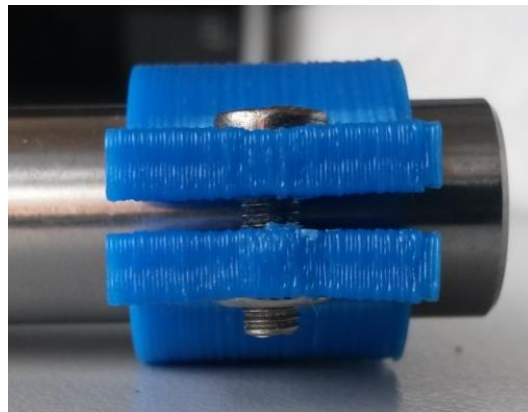
79. Tuerca M3 de abrazadera

Dicho apriete del tornillo de M3 se efectúa con un par de apriete de unos 2 - 3 Nm, calculado con la ayuda de una llave dinamométrica. Con este apriete se consigue una fijación firme y segura de los elementos, si ocasionar la rotura de la abrazadera de plástico. Como referencia, el par de apriete aplicado al modelo CA-2 de Newport tiene su valor óptimo entre 8 - 10 Nm.



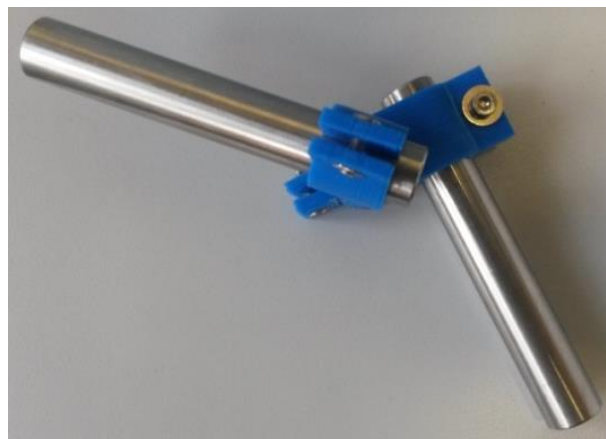
803. Ensayo de par de apriete con llave dinamométrica

Para comprobar el apriete correcto, también puede medirse el espacio entre las pestañas de la abrazadera, que se habrá tenido que reducir de los 2 mm iniciales hasta 0.8 - 1.2 mm.



81. Espacio entre pestañas de abrazadera

Por último, se monta el conjunto final utilizando como sistema de fijación tornillos y tuercas hexagonales de métrica 3:

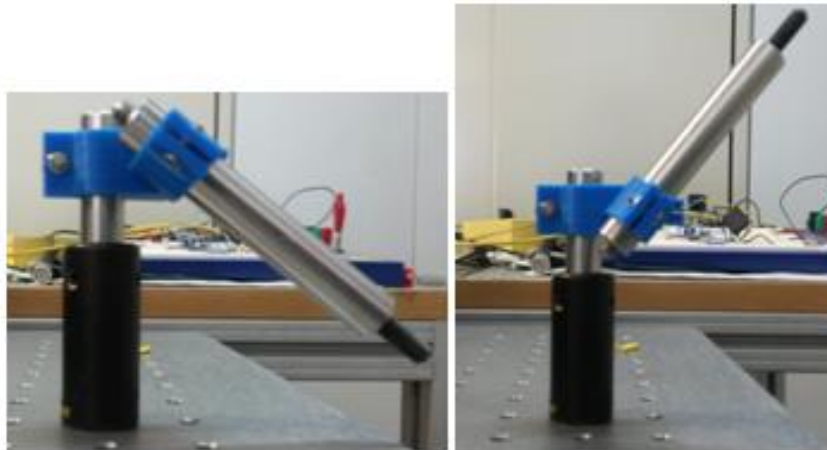


82. Diseño 3 montado

7.3.3. Conclusiones

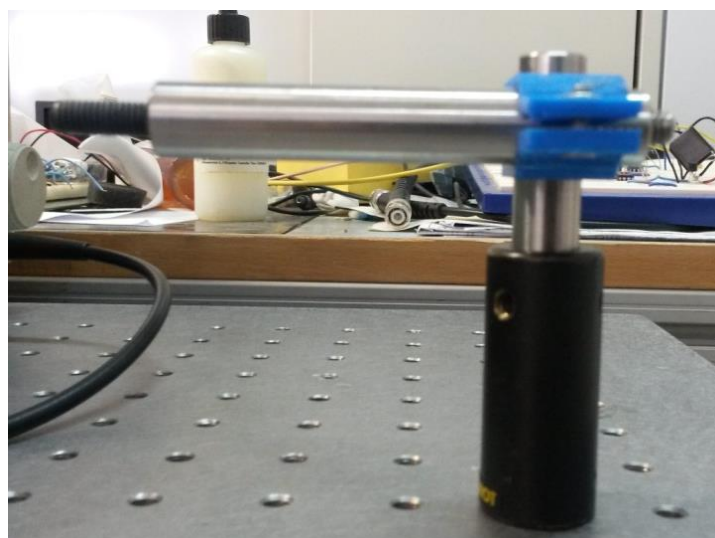
- Funcionalidad:

El conjunto obtenido permite la rotación relativa de las partes alrededor de los 360°. La fijación entre los elementos impide correctamente el deslizamiento o giro entre los postes y las piezas de plástico.



83. Conjunto 3 en varias posiciones

En caso de que el sistema óptico requiera de un ángulo entre postes de 90°, solo sería necesario utilizar una de las piezas, la abrazadera fija, ya que los dos agujeros que incorpora son compatibles para los postes de diámetro de 1/2". De esta manera se eliminarían posibles holguras o deslizamientos entre las abrazaderas, ya que en este caso solo se utilizaría una.



84. Posición de 90°

- Calidad superficial:

No siendo un factor determinante, el acabado superficial de las piezas ha sido bastante bueno, exceptuando las zonas de la abrazadera fija que se han impreso con ayuda de un soporte, en las que han quedado restos y marcas de dicho soporte.

- Resistencia:

Debido a la función para la que están diseñadas las piezas, éstas deben tener una combinación de resistencia y flexibilidad. Deben ser resistentes debido a las fuerzas de apriete a las que se somete al fijarse sobre el poste, pero también deben tener cierta flexibilidad para permitir dicho apriete sin quebrarse ni romperse.

Las piezas obtenidas cumplen con ambos requisitos. Se podía haber mejorado el aspecto de la resistencia aumentando el relleno en la impresión o diseñando con mayor grosor las zonas más solicitadas.

Para evaluar la resistencia del conjunto, se ha procedido a realizar un ensayo del peso que puede soportar en el extremo del poste sin que se varíe el ángulo. Dicho ensayo se ha realizado con las piezas formando un ángulo de 90° entre los postes, y colocando peso sobre el extremo del poste horizontal. El peso que ha soportado el conjunto impreso ha sido de 1.5 kg en el extremo, que se traduce en un par sobre la unión de 1.2 Nm. Este peso es suficiente para la mayoría de las aplicaciones de la optomecánica para las que están destinadas. Como referencia, el modelo de Newport ha soportado un peso de 5 kg en el mismo ensayo, que se traduce en 4 Nm sobre la unión, teniendo en cuenta que sus elementos se han podido apretar más debido a que soportaban un mayor par de apriete. Permitir dar un mayor par de apriete significa una mayor fijación entre los componentes y por tanto, mayor dificultad y fuerza necesaria para conseguir un movimiento relativo entre ellos.

- Tiempo de fabricación:

Los tiempos de impresión (calculado por Cura), de preparación y de montaje vienen resumidos en la siguiente tabla:

Tiempo	Abrazadera fija	Abr. móvil	Pasador	TOTAL
Diseño 3D	30	20	1	51
Impresión (min)	48	22	8	78
Preparación previa (min)	15	-	-	15
Prep. posterior (min)	10	2		12
Montaje (min)		5		5
				161 min

Tabla 14. Tiempos de fabricación del Diseño 3

Como las tres piezas se han impreso de forma sucesiva, es decir, al acabar de imprimir una se ha comenzado la siguiente impresión, el tiempo de preparación previa solo se ha tenido en cuenta una vez.

En el tiempo de preparación posterior se ha tenido en cuenta el lijado de la abrazadera fija y la eliminación de los restos de soporte, y el pegado entre el pasador y la abrazadera móvil.

- Coste:

De nuevo el software Cura calcula y muestra el coste de cada pieza y el gasto de material ABS en función de su densidad (1240 kg/m^3) y precio (20 €/kg).

	Abrazadera fija	Abr. móvil	Pasador	TOTAL
Filamento extruido (m)	2.59	1.06	0.58	4.23
Peso (g)	8	3	2	13
Coste (€)	0.15	0.06	0.03	0.24

Tabla 15. Gastos de material y costes del Diseño 3

El modelo que se ha tomado de referencia es el SWC de la empresa *Thorlabs, Inc.* tiene un precio de 20.34 €, y el modelo CA-2 de *Newport* tiene un coste de 25 €. Ambos productos cumplen las mismas funciones que el conjunto diseñado e impreso, mientras que éste, tiene un coste de material de 0,24 €, sin contar la tornillería. Salta a la vista la gran diferencia en el precio por lo que, cumpliendo con la función que va a desempeñar, el conjunto impreso se convierte en una opción totalmente rentable frente a productos comerciales de este tipo.

Aunque no es un factor determinante, también se ha reducido considerablemente el peso: 50 gramos del modelo SWC o 40 g del de *Newport* frente a los 13 gramos (sin contar tuercas y tornillos) del conjunto diseñado e impreso.

8. Conclusiones generales

En este trabajo se pretendía hacer un estudio de la impresión 3D aplicada a la optomecánica, utilizando para ello una impresora 3D Open Source de bajo coste. Al finalizar el proyecto, el resultado ha sido satisfactorio, obteniéndose las siguientes conclusiones:

- Se ha conseguido montar y calibrar una impresora 3D de código abierto, la Power Code, así como la instalación del firmware y software necesarios para su correcto funcionamiento.
- Se han conseguido dominar los parámetros de impresión más influyentes, para conseguir optimizar tanto los tiempos de impresión, como la calidad de las piezas o sus costes.
- También se han conseguido piezas útiles y efectivas para poder instalar en un sistema óptico con el fin de realizar un ensayo, comparando dichas piezas impresas con productos comerciales similares del mercado que se disponían en el laboratorio y que han servido de referencia.
- Una de las grandes ventajas de la impresión 3D es su versatilidad, es decir, poder diseñar y personalizar una pieza atendiendo a las necesidades de cada caso, ya que en muchos casos, ni siquiera existe un producto comercial que cumpla todos los requisitos que deseamos. En la optomecánica, dicha versatilidad es muy útil para ampliar el abanico de configuraciones de un sistema óptico, consiguiendo multitud de combinaciones y posiciones.
- Una de las limitaciones que posee una impresora 3D de este tipo es su volumen de impresión o tamaño máximo de las piezas que pueden fabricar. Este tamaño es más que suficiente para la mayoría de los elementos utilizados en optomecánica, ya que normalmente no son muy voluminosos.
- La calidad de las piezas que se obtienen por una impresora 3D de bajo coste puede ser suficiente para fabricar piezas de optomecánica, ya que el requisito principal de estas piezas normalmente es el de sujetar, contener o combinarse con otros elementos del sistema óptico, es decir, es más prioritaria la función estructural que la estética.
- Al finalizar la impresión, generalmente las piezas no están listas para usar directamente, sino que suelen necesitar un lijado o retirar alguna gota o exceso de material, sobre todo cuando ha sido necesaria la impresión 3D con ayuda de un soporte auxiliar.

- Dependiendo de la función que vaya a desempeñar cada pieza en un sistema óptico requerirá de mayor o menor resistencia. Gracias a la impresión 3D se puede fabricar cada pieza teniendo esto en cuenta, por lo que se pueden modificar parámetros de impresión como la densidad de relleno o el grosor de las paredes de la figura, para modificar su resistencia en función de nuestras necesidades.
- El material utilizado, el ABS, no presenta excesivas dificultades para imprimir. Una de estas necesidades es el *warping*, ya comentado anteriormente, que puede eliminarse utilizando laca o acetona sobre el espejo de la base, o actuando sobre las temperaturas de impresión y de la cama caliente.
- El coste de este material es de media de unos 20 - 25 €/kg, relativamente bajo, más aún si se tiene en cuenta su baja densidad y bajo gasto de material que requieren las piezas, ya que normalmente no son figuras macizas sino parcialmente huecas. Es por ello que se observa que las piezas obtenidas con impresión 3D para optomecánica tienen un coste de material muy bajo comparado con el elevado precio de los productos comerciales similares.
- Por contra, hay que tener en cuenta la inversión inicial en la impresora 3D que es alta, aun tratándose de una impresora 3D de bajo coste. Este elevado gasto puede quedar amortizado a lo largo del tiempo, compensado con el bajo precio de material y piezas antes mencionado.
- La impresión 3D, hoy por hoy, no está preparada para producir grandes lotes de piezas debido a sus elevados tiempos de impresión. En cambio, sí es una buena opción para conseguir objetos concretos y personalizados, como en el caso de la optomecánica y las piezas propuestas durante el proyecto.

9. Bibliografía y referencias

9.1. Referencias

- [1] Thingiverse, www.thingiverse.com
- [2] Abraham de los Ángeles Díaz García, *Desarrollo de un sensor de temperatura remoto basado en la radiación infrarroja*, Proyecto Fin de Carrera (Ingeniería Industrial), UC3M, Leganés, Octubre de 2012.
- [3] Pedro Martín-Mateos, Sergio Crespo-García, Marta Ruiz-Llata, José Ramón Lopez-Fernandez, José Luis Jorcano, Marcela Del Rio, Fernando Larcher y Pablo Acedo, *Remote diffuse reflectance spectroscopy sensor for tissue engineering monitoring based on blind signal separation*, Biomedical Optics Express, Vol. 5, Issue 9, pp. 3231-3237, 2014
- [4] Marta Ruiz-Llata, Pedro Martín-Mateos, José R. López, Pablo Acedo, *Remote optical sensor for real-time residual salt monitoring on road surfaces*, Sensors and Actuators B: Chemical, Vol. 191, pp. 371-376, Febrero, 2014

9.2. Bibliografía

- Juan Pablo Rodríguez García, *Implementación de triple extrusor sobre impresora 3D de bajo coste*, Proyecto Fin de Carrera (Ingeniería Industrial), UC3M, Leganés, Julio de 2014.
- Marco Esteban Illescas, *Construcción de una impresora 3D Open Source*, Trabajo Fin de Grado (Grado en Ingeniería Electrónica Industrial y Automática), UC3M, Leganés, Junio de 2012.
- Arturo Vera García, *Protocolo de calibración y optimización mecánica de una impresora 3D open source*, Trabajo Fin de Grado (Grado en Ingeniería Electrónica Industrial y Automática), UC3M, Leganés, Julio de 2012.
- Antonio Alberto Relaño Pastor, *Estudio comparativo de piezas de ABS y PLA procesadas mediante modelado por deposición fundida*, Proyecto Fin de Carrera (Ingeniería Industrial), UC3M, Leganés, Octubre de 2013.
- Alberto Juan Alburquerque, *Optimización y caracterización de piezas fabricadas mediante técnicas aditivas*, Trabajo Fin de Grado (Grado en Ingeniería en Tecnologías Industriales), UC3M, Leganés, Septiembre de 2014.
- Javier Pérez Sáiz, *Mejora y optimización hardware y software de un prototipo de impresora 3D*, Trabajo Fin de Grado (Grado en Electrónica Industrial y Automática), Universidad de Burgos, Junio de 2014.
- Proyecto RepRap, reprap.org
- Trimaker - Impresión 3D, www.trimaker.com
- Wikipedia, "*Impresión 3D*". [Online]. Disponible en: http://es.wikipedia.org/wiki/Impres%C3%B3n_3D
- Wikipedia, "*Impresoras 3D*". [Online]. Disponible en: http://es.wikipedia.org/wiki/Impresora_3D
- Hexxon, "*Introducción a las diferentes tecnologías de impresión 3D*", Noviembre, 2014. [Online]. Disponible en: <http://hexxon.es/las-diferentes-tecnologias-de-la-impresion-3d/>
- Terra Meddia, "*Introducción a las impresoras 3D*", Enero, 2013. [Online]. Disponible en: <http://bloc.meddia.net/es/introduccion-a-las-impresoras-3d>

- Luis Sánchez Blasco, "*Impresión 3D por compactación o solidificación de materiales*", Abril, 2014. [Online]. Disponible en: Cosas de arquitectos, <http://www.cosasdearquitectos.com/2014/04/impresion-3d-por-compactacion-de-o-solidificacion-de-materiales/>
- Guillermo Reyes Pozo, "*Fabricación Aditiva: Tecnologías*". [PDF]. Disponible en: <http://www.eic.cat/gfe/docs/10585.pdf>
- Maker Shop BCN, makershopbcn.com
- Daniel Burón, "*Impresión 3D: llega el futuro de los sistemas de producción*", Noviembre, 2013. [Online]. Disponible en: Silicon Week, <http://www.siliconweek.es/workspace/impresion-tridimensional-llega-el-futuro-de-los-sistemas-de-produccion-49043>
- Formizable, "*Guía de plásticos y otros materiales para impresión 3D*", Septiembre, 2014. [Online]. Disponible en: <http://formizable.com/2014/09/02/guia-de-plasticos-y-otros-materiales-para-impresion-3d/>
- Impresoras 3D, www.impresoras3d.com
- Stratsys, <http://www3.stratsys.se/en/>
- Tak'n'life, www.teknlife.com
- Createc3D, www.createc3d.com
- Thorlabs, Inc., www.thorlabs.de
- Newport Corporation, www.newport.com
- Edmund Optics Inc., www.edmundoptics.com
- Standa Ltd, www.standa.lt
- Laser 2000, www.laser2000.es
- Shuttl3D, lab.shuttl3d.com
- Sicnova3D, sicnova3d.com
- Imprimalia3D, www.imprimalia3d.com
- Ofinnova 3D S.L., ofinnova.com

- Pablo Uslé Presmanes, "*Límites que impone la ley española al usuario de impresoras 3D*", Noviembre, 2014. [Online]. Disponible: Abanlex, <http://www.abanlex.com/2014/11/limites-que-impone-la-ley-espanola-al-usuario-de-impresoras-3d/>
- Pablo Fernández Burgueño, Jorge López Baqueriza, "*Las impresoras 3D, un nuevo horizonte legal*", ABC, Enero, 2013. [Online], Disponible en: Abanlex, <http://www.abanlex.com/2013/08/las-impresoras-3d-imprimen-un-nuevo-horizonte-legal/>
- Asdef 3D, "*Introducción a Marlin*". [PDF]. Disponible en: <http://www.asdef3d.com/wp-content/uploads/2014/10/Introduccinn-a-Marlin-asdef3d.pdf>
- Zona Maker, www.zonamaker.com
- CapalTresd, "*Instalación Firmware Marlin*", Abril, 2015. [Online]. Disponible en: <http://www.capaltresd.com/wordpress/?p=590>
- "*Carga del firmware y calibración de los drivers*", [PDF]. Disponible en: https://static-bqreaders.s3.amazonaws.com/file/Prusa/prusa_QSG_calibration_ES.pdf
- Wikipedia, "*Controlador PID*". [Online]. Disponible en: http://es.wikipedia.org/wiki/Controlador_PID

10. Anexos

ANEXO I: Presupuesto

El presupuesto realizado durante el proyecto se caracteriza por una alta inversión inicial de la máquina y un bajo coste de material y las piezas impresas.

A continuación se muestran unas tablas comparativas entre el presupuesto del proyecto y la adquisición de los productos comerciales de Thorlabs y Newport tomados como referencia.

- **Impresión de componentes optomecánicos:**

Diseño	Pieza	Coste unitario (€)	TOTAL (€)
1	Tapa superior	0.03	0.64
	Tubo	0.52	
	Tapa inferior	0.09	
2	Plataforma	0.74	1.28
	Sujeción	0.02	
	Brazo	0.19	
	Montura Tipo A	0.16	
	Montura Tipo B	0.16	
3	Abrazadera fija	0.15	0.24
	Abrazadera móvil	0.06	
	Pasador	0.03	

Tabla 16. Presupuesto de componentes impresos

Inversión inicial	Coste
Impresora 3D Power Code + 1 kg de ABS	500 €

Tabla 17. Inversión inicial

- **Compra de productos comerciales similares:**

Diseño	Pieza	Coste unitario (€)	TOTAL (€)
1	SM1L20	14.85	31.39
	SM1F1	16.54	
	2 x SM1RC	20.42	
2	4 x TR3V	11.57	105.66
	2 x RA180	9.27	
3	CA-2	25	25

Tabla 18. Presupuesto de productos comerciales

Comparando con ambos presupuestos, se puede concluir que la impresora 3D adquirida quedará amortizada a corto plazo debido al poco gasto de material en las piezas, al bajo coste de materia prima (20 €/kg) y al elevado precio de los productos comerciales en comparación con las piezas impresas, por lo que resulta rentable el uso de la impresión 3D en el ámbito de la optomecánica.

ANEXO II: Configuración del firmware Marlin

Como se ha mencionado, los parámetros de configuración del firmware aparecen en la pestaña *Configuration.h*. A continuación se muestra una explicación detallada de estas variables principales junto a los valores establecidos.

- **Variables generales**

```
#define BAUDRATE 250000
```

Aquí se indica la velocidad de comunicación entre la placa y el software de impresión. En este caso es de 250.000 baudios, valor que también se tendrá que indicar más adelante en el programa Pronterface.

```
#define MOTHERBOARD 33
```

En esta sentencia se debe indicar la placa con la que se trabaja, en este caso es la RAMPS 1.4. con un solo extrusor por lo que se escoge la opción "33" o "BOARD_RAMPS_13_EFB" (es la misma placa pero admite ambas nomenclaturas) de la lista de placas que aparece en el propio código o en la pestaña *"boards.h"*.

```
#define EXTRUDER 1
```

Se indica el número de extrusores que tiene la impresora, es este caso uno.

- **Configuraciones de temperatura (*Thermal Settings*)**

```
#define TEMP_SENSOR_0 1
```

```
#define TEMP_SENSOR_1 0
```

```
#define TEMP_SENSOR_2 0
```

```
#define TEMP_SENSOR_BED 1
```

En esta parte se seleccionan los termistores utilizados para medir la temperatura de los elementos calefactores (HotEnd y cama caliente), que son termistores tipo 1 (NTC de 100k) de la lista que aparece. Se marcan con 0 (desactivado) el resto de termistores ya que no se utilizan porque solo tenemos un extrusor. SENSOR_0 hace referencia al único HotEnd que tenemos.

```
#define HEATER_0_MINTEMP 5  
  
#define BED_MINTEMP 5  
  
#define HEATER_0_MAXTEMP 260  
  
#define BED_MAXTEMP 140
```

A continuación se fijan las temperaturas mínimas y máximas, expresadas en grados centígrados, de los sensores antes indicados. La temperatura mínima superior a 0 sirve para detectar la ausencia o rotura de la conexión del sensor, mientras que la temperatura máxima evita un cortocircuito y desactiva la potencia de los dispositivos cuando la temperatura excede la indicada.

- **Configuraciones de PID (PID Settings)**

Un controlador PID es un mecanismo de control por realimentación ampliamente usado en sistemas de control industrial. Este calcula la desviación o error entre un valor medido y un valor deseado, actuando en consecuencia sobre los actuadores, en este caso sobre los calefactores. El PID consiste en tres parámetros: el proporcional (Kp), que depende del error actual; el integral (Ki), que depende de errores pasados; y el derivativo (Kd), que es una predicción de errores futuros.

El PID está programado en el propio Arduino y se debe configurar para una regulación de temperatura lo más precisa posible.

```
#define DEFAULT_Kp 22.2  
  
#define DEFAULT_Ki 1.08  
  
#define DEFAULT_Kd 114
```

Los valores establecidos por defecto funcionan bien, pero para optimizarlos, hay que ejecutar el comando "m303" en la consola de comandos del Pronterface. El programa calentará el HotEnd y realizará una serie de iteración hasta mostrar unos valores de Kp, Ki y Kd. Estos valores se sustituyen en el firmware, con lo que se conseguirá una temperatura del HotEnd más estable y con menos oscilaciones. Se puede repetir el proceso hasta que converja en unos valores óptimos.

También se podría repetir el proceso para configurar el PID de la cama caliente, pero no es necesario en este caso, por lo que se dejan los valores preestablecidos.

```
#define PREVENT_DANGEROUS_EXTRUDE
```

Esta variable protege el HotEnd en casa de que intentemos extruir y éste no haya alcanzado la temperatura suficiente.

```
#define PREVENT_LENGTHY_EXTRUDE
```

Limita la longitud máxima de la extrusión.

- **Configuraciones mecánicas (*Mechanical Settings*)**

Estos parámetros hacen referencia a los finales de carrera y a los movimientos de los ejes de la impresora.

```
const bool X_MIN_ENDSTOP_INVERTING = true
```

```
const bool Y_MIN_ENDSTOP_INVERTING = true
```

```
const bool Z_MIN_ENDSTOP_INVERTING = true
```

Con estas sentencias se puede invertir la lógica de los finales de carrera, escogiendo entre `true` o `false`.

```
#define DISABLE_X true
```

```
#define DISABLE_Y true
```

```
#define DISABLE_Z true
```

Activando estas variables (`true`) se desactiva el motor correspondiente cuando no se está usando.

```
#define INVERT_X_DIR true
```

```
#define INVERT_Y_DIR true
```

```
#define INVERT_Z_DIR false
```

```
#define INVERT_E0_DIR true
```

Modificando estas variables se puede cambiar el sentido de giro de los motores.

```
#define X_HOME_DIR -1
```

```
#define Y_HOME_DIR -1
```

```
#define Z_HOME_DIR -1
```

Se indica la dirección hacia donde se encuentran los finales de carrera. Se establece un valor de 1 cuando el final de carrera esté en la posición máxima del eje y -1 cuando se encuentra en el mínimo, como es en este caso.

```
#define X_MAX_POS 195
```

```
#define X_MIN_POS 0
```

```
#define Y_MAX_POS 190
```

```
#define Y_MIN_POS 0
```

```
#define Z_MAX_POS 190
```

```
#define Z_MIN_POS 0
```

En estas sentencias se establecen los límites del área de impresión, expresados en milímetros. Con esto se evita que los elementos móviles choquen contra el lado opuesto a donde se encuentra el final de carrera.

```
#define HOMING_FEEDRATE (1000,1000,100,0)
```

Aquí se indica la velocidad (en mm/min) que realiza cada eje durante el "*homming*", que es el desplazamiento hacia el final de carrera o punto "0" de cada eje. Al igual que en las siguientes sentencias, el primer valor corresponde al eje X, el segundo al eje Y, el tercero al Z y el ultimo al extrusor.

```
#define DEFAULT_AXIS_STEPS_PER_UNIT (100,100,4000,950)
```

Esta es una sentencia muy importante que va a determinar la precisión de las piezas ya que es donde se indican los pasos por milímetro realizados por cada motor y, en

definitiva, determinará si cada eje se desplaza exactamente los mismos milímetros que se le ordenan. Estos valores irán en función de los motores utilizados, las poleas, y las varillas roscadas del eje Z.

Para calcular estos valores:

- En los ejes X e Y: Desde el Pronterface, se selecciona en cada eje un movimiento de 100 mm y se mide la distancia real que se ha desplazado. Para obtener el valor adecuado, se divide la distancia medida entre la distancia que se ha ordenado mover, y se multiplica por el valor configurado de pasos por milímetro. El valor resultante será el óptimo que se debe establecer en esta sentencia.

- En el eje Z: Los pasos por milímetro van a depender de los pasos del motor, de la resolución de los drivers con los *jumpers*, y del paso de rosca de la varilla. Con todo esto se calculan los pasos por milímetro con la siguiente fórmula:

$$\text{PASOS/MM} = \text{PASOS_DEL_MOTOR} / \text{VUELTA} \times \text{MICRO_PASOS_DEL_DRIVER} / \text{PASO_VARILLA}$$

Los motores Nema 17 tienen 200 pasos por vuelta, la resolución de los drivers con 4 jumpers es de 16, y las varillas de métrica 5 tienen un paso de 0.8 mm.

$$\text{PASOS/MM} = 200 \times 16 / 0.8 = 4000$$

- En el extrusor: Para obtener los pasos por milímetro necesarios en el extrusor, hay dos posibilidades, calibrarlo antes de montar el HotEnd sobre el extrusor o después, pero esta última resulta algo más compleja porque implica calentar el HotEnd para extruir filamento. De la primera forma, y con la electrónica instalada y el Pronterface conectado a la impresora, se ordena extruir (desde el Pronterface) una cantidad de 100 mm. Se mide la cantidad real de filamento que ha salido por el extrusor. Para calcular el valor del parámetro a establecer en esta sentencia:

$$\text{PASOS/MM} = (\text{VALOR_ESTABLECIDO} / \text{MEDIDA REAL}) \times 100 \text{ (DISTANCIA QUE SE ORDENÓ EXTRUIR)}$$

En este caso el motor del extrusor queda configurado a 950 pasos por milímetro.

```
#define DEFAULT_MAX_FEEDRATE (500,500,3,25)
```

```
#define DEFAULT_MAX_ACCELERATION (1000,1000,25,5000)
```

Aquí se establecen las máximas velocidades y aceleraciones permitidas de cada eje o del extrusor, expresadas en mm/s y en mm/s² respectivamente.

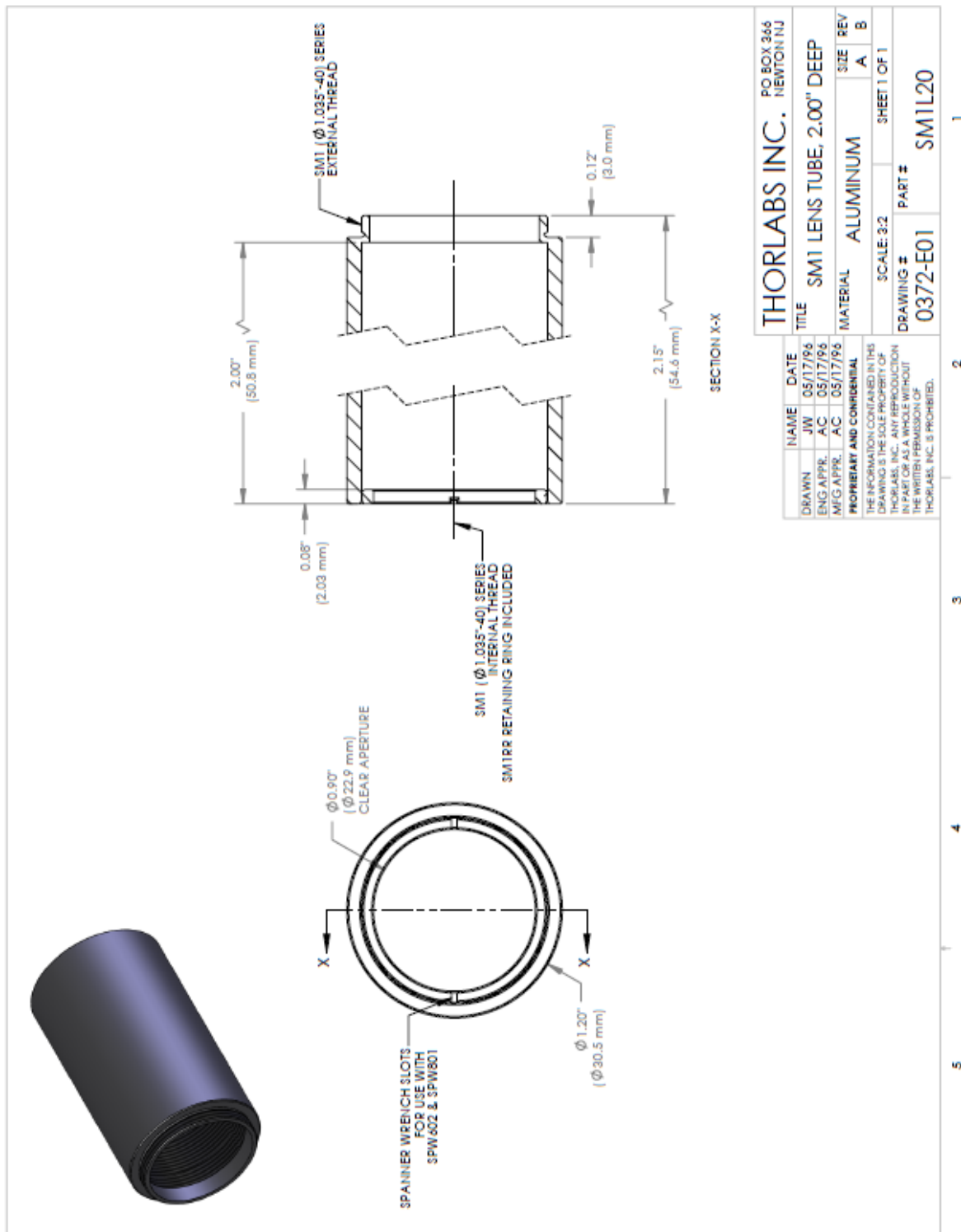
- **Configuraciones adicionales**

Las últimas sentencias del código de la pestaña *Configuration.h* están dedicadas a la configuración de elementos adicionales como el adaptador de tarjetas SD o micro SD, o la pantalla LCD

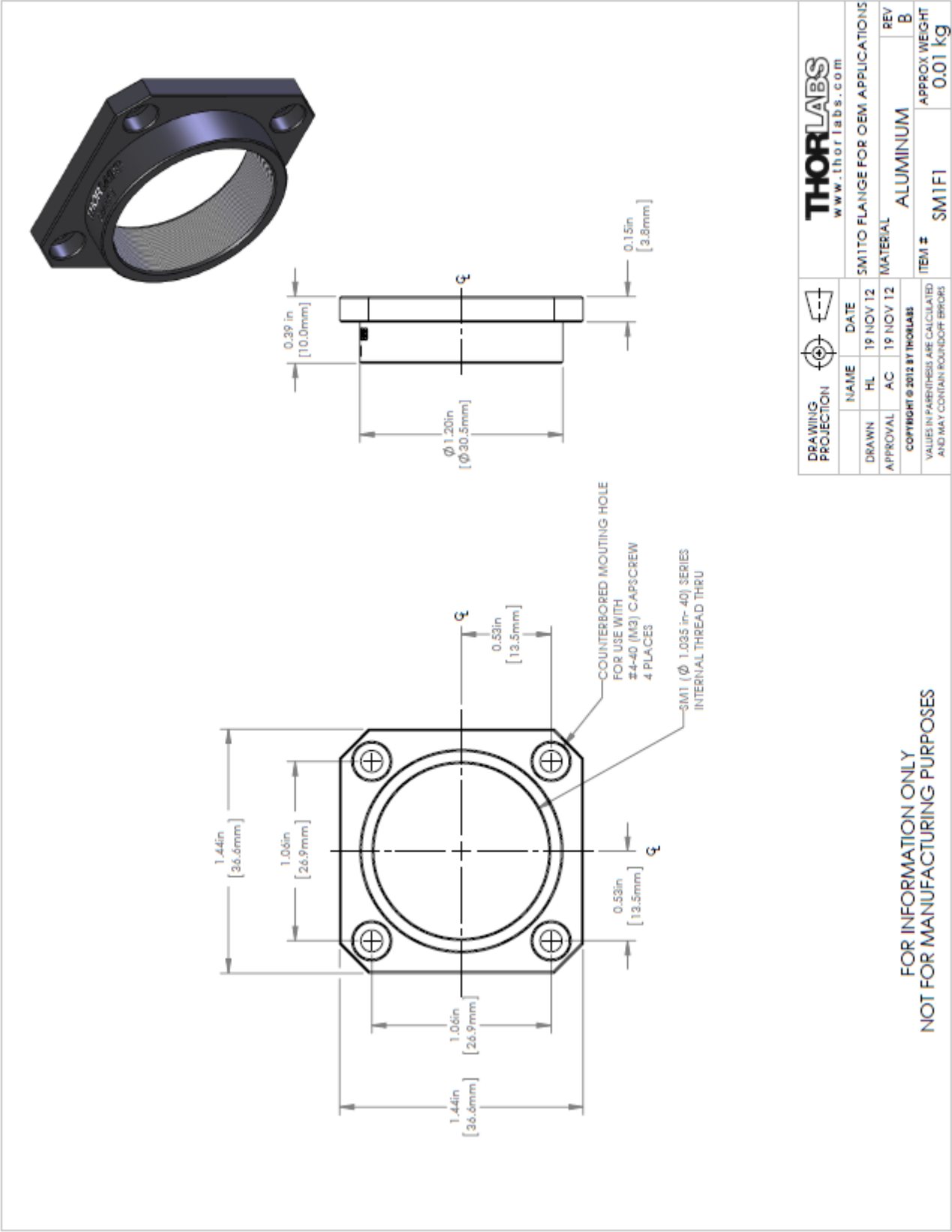
ANEXO III: Planos

DISEÑO 1

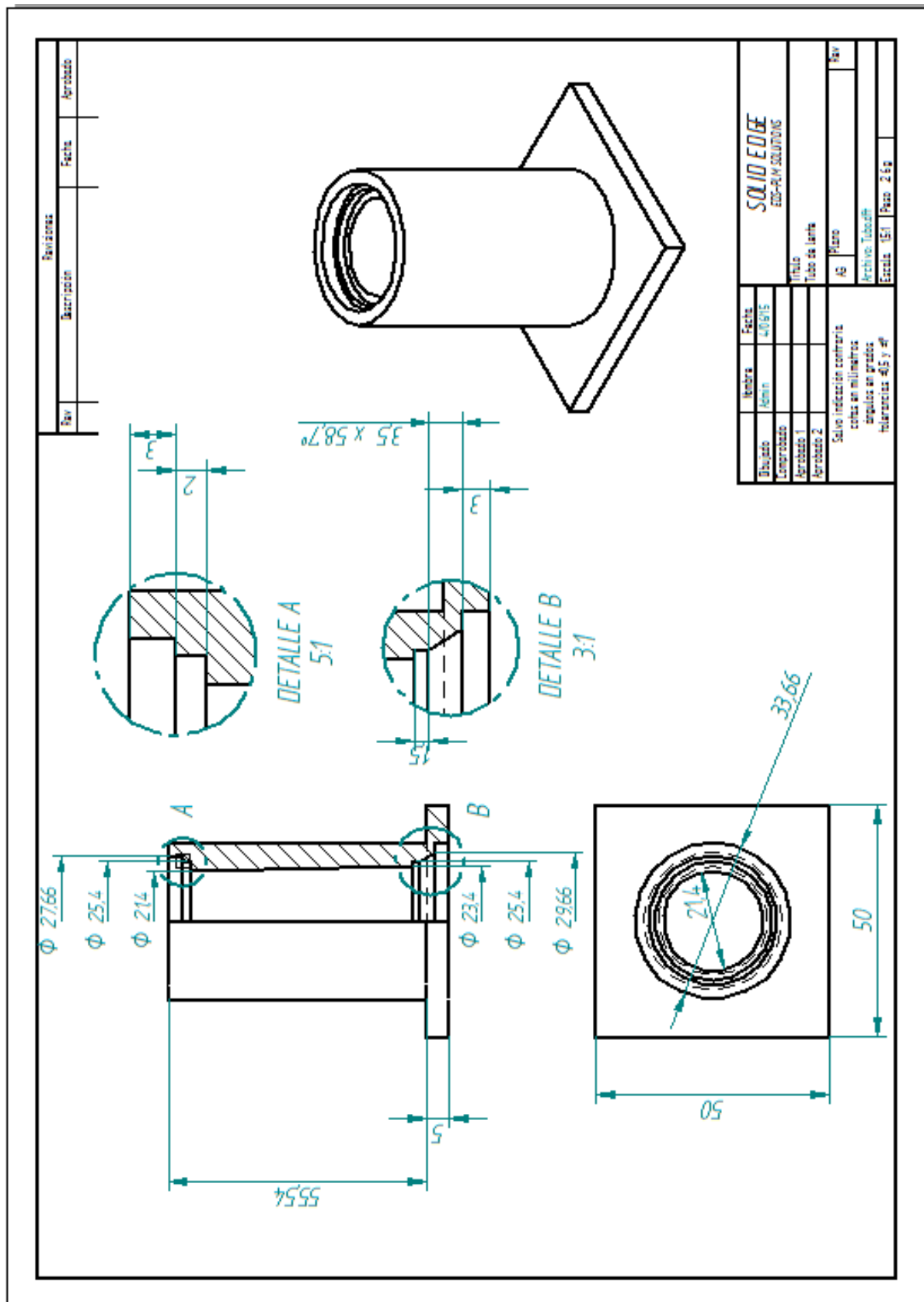
- SM1L20 de Thorlabs



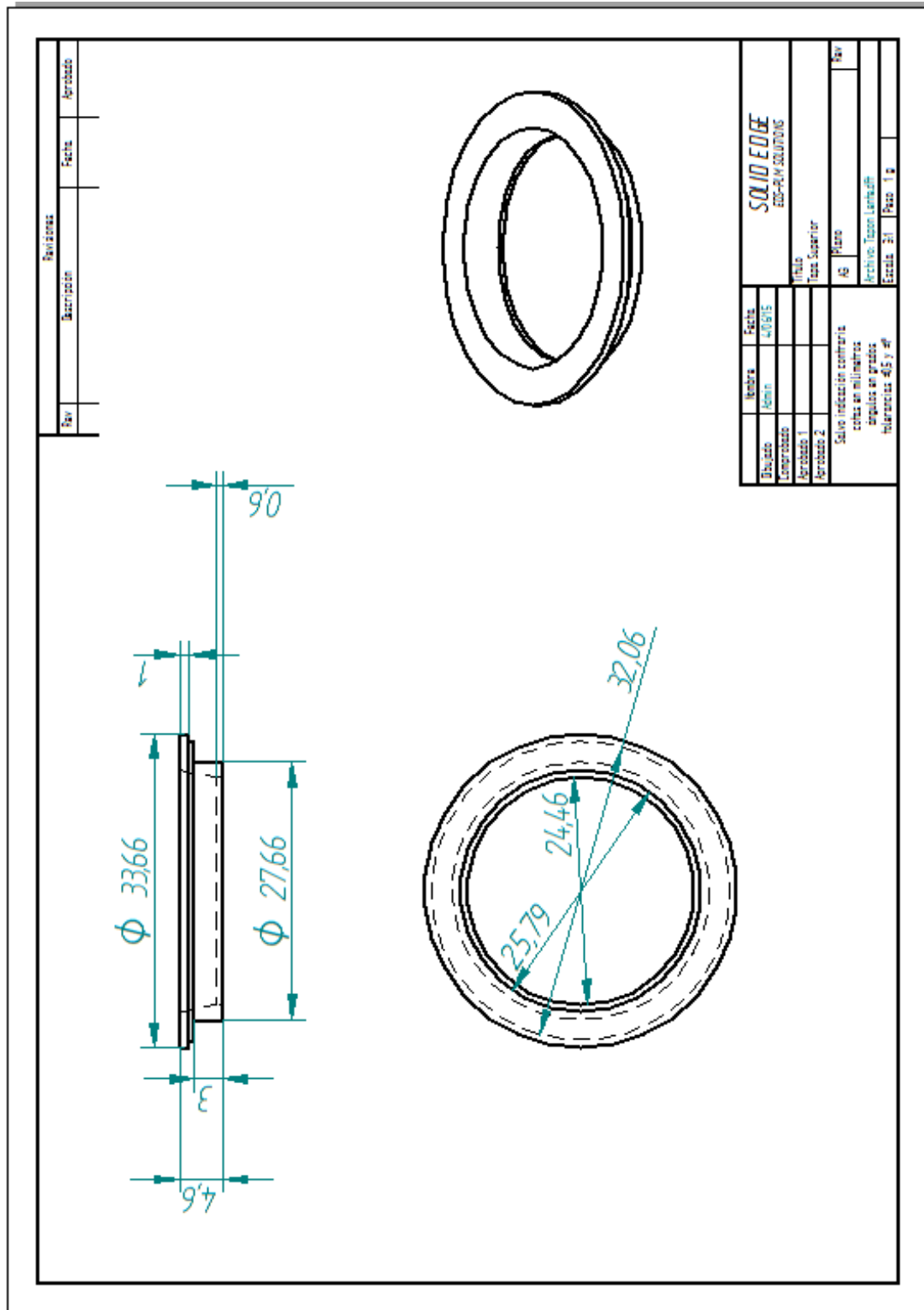
● SM1F1 de Thorlabs



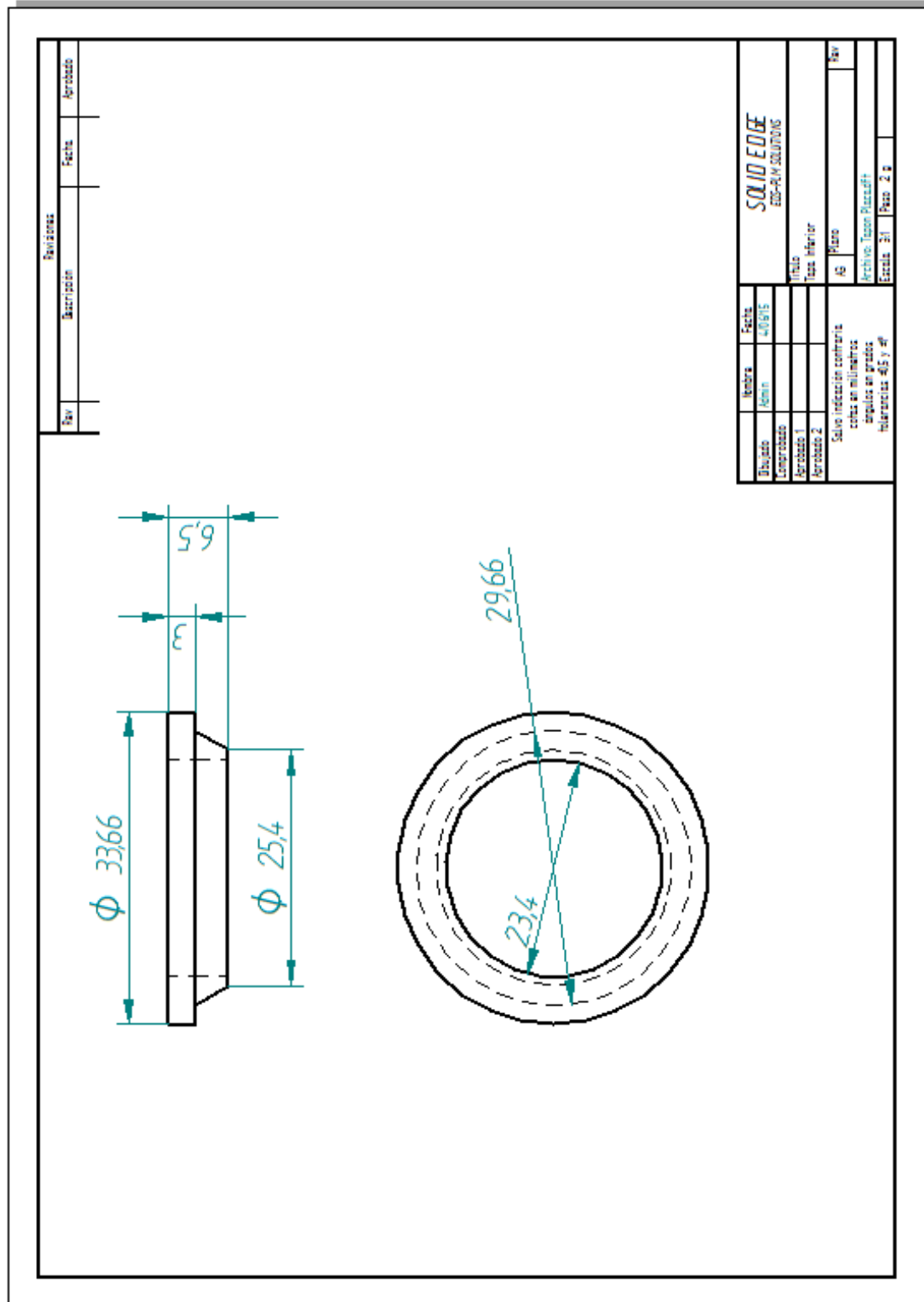
- Cilindro o Tubo de lente



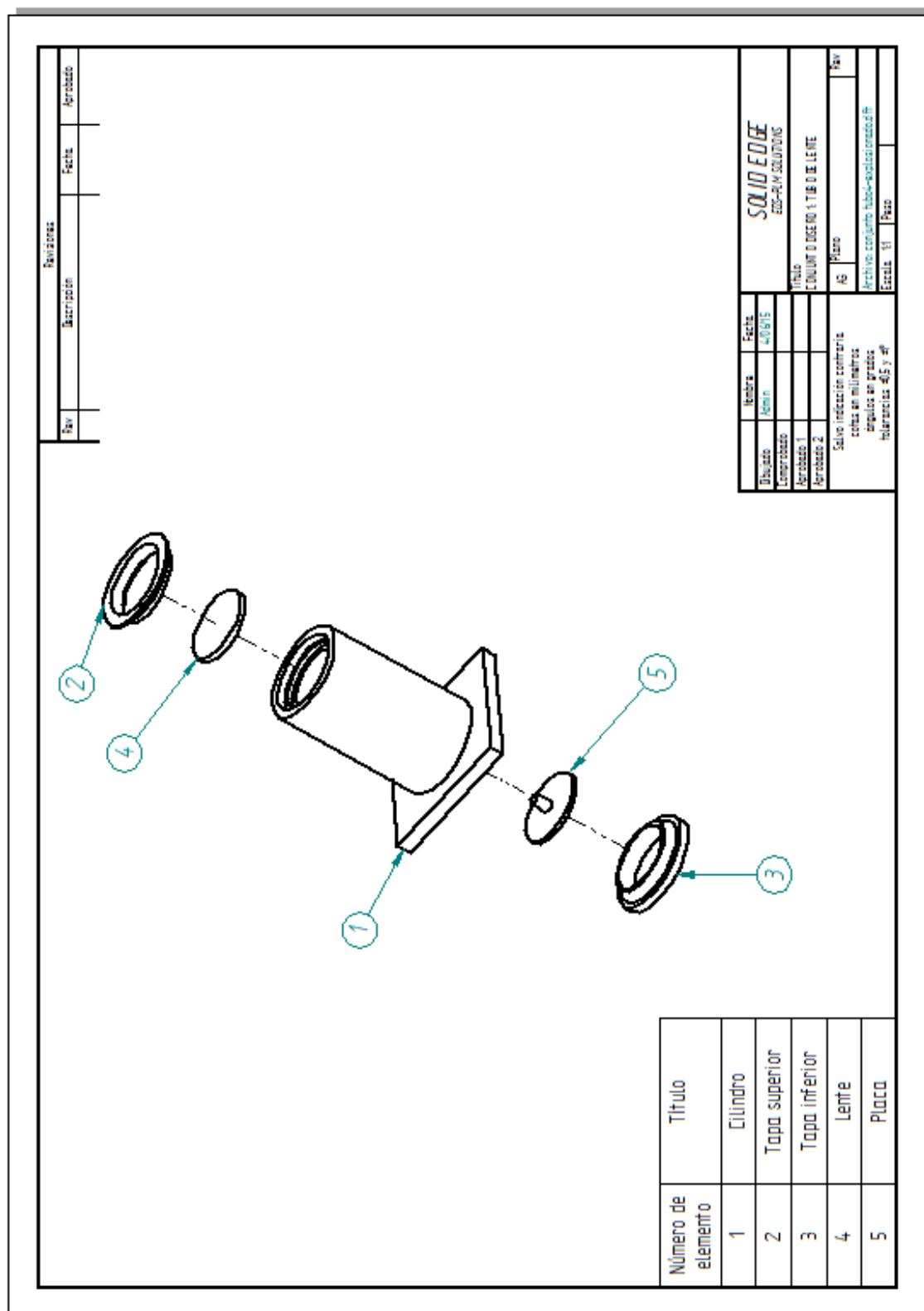
- Tapa Superior



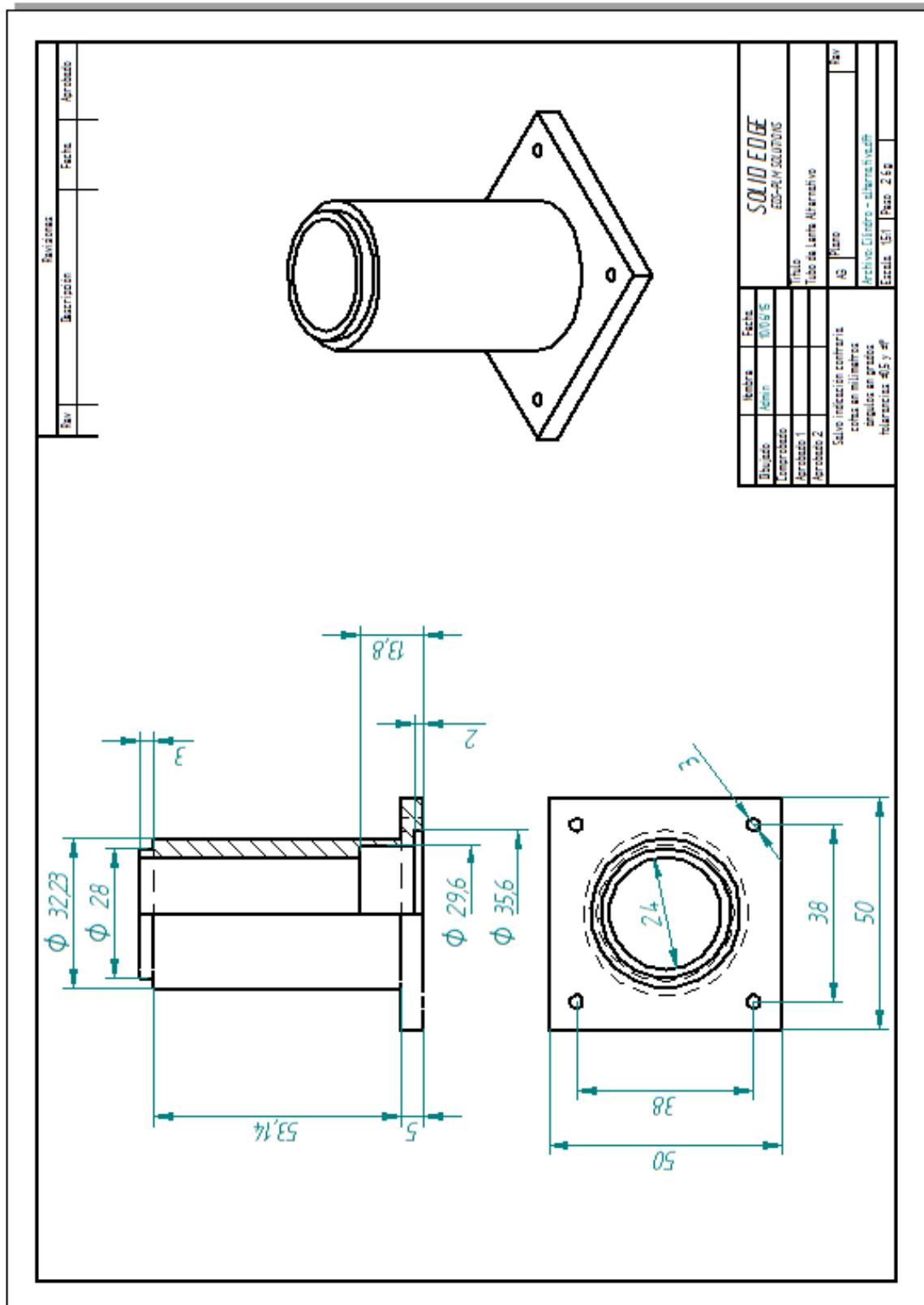
- Tapa Inferior



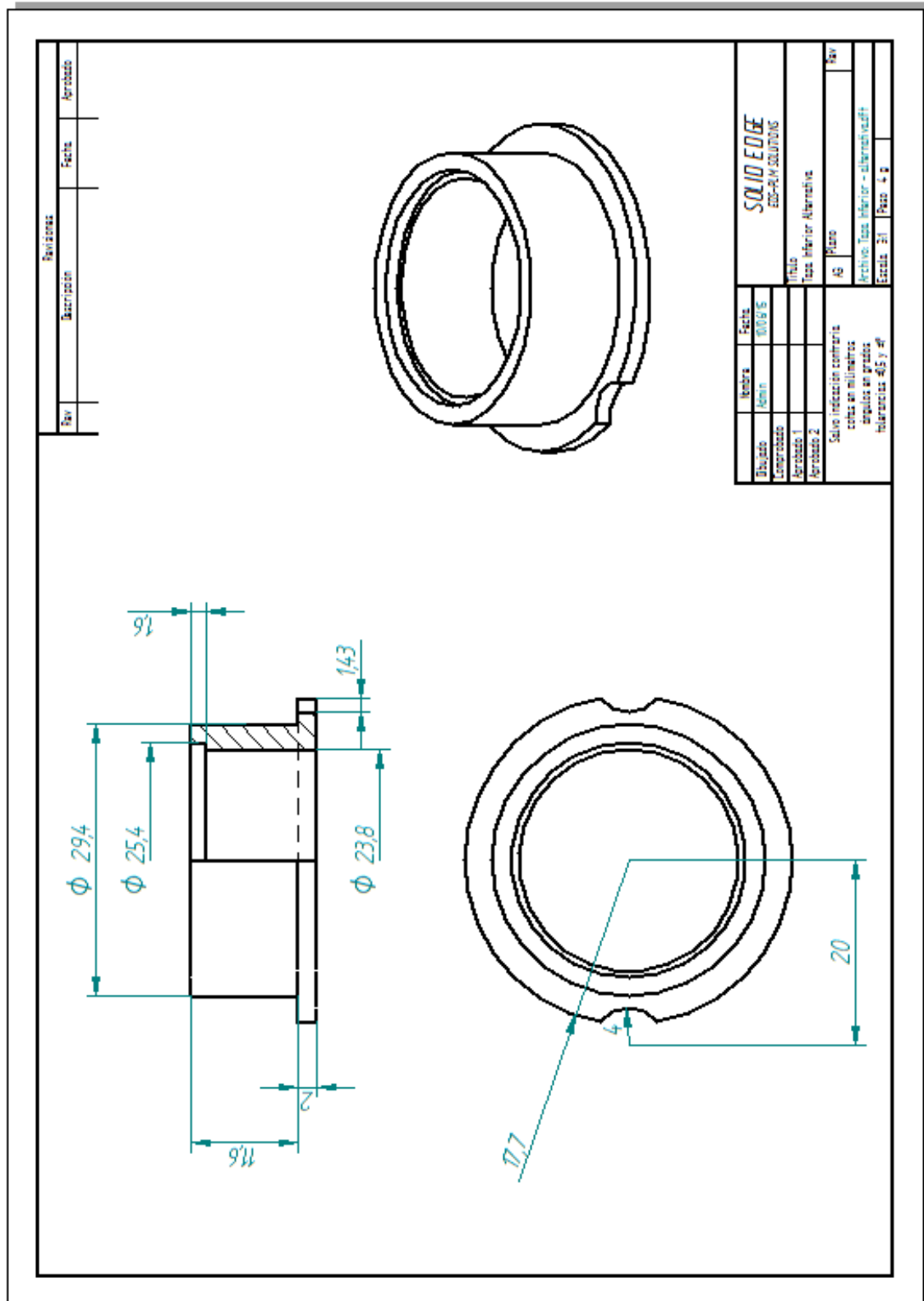
- Diseño 1: Vista explosionada



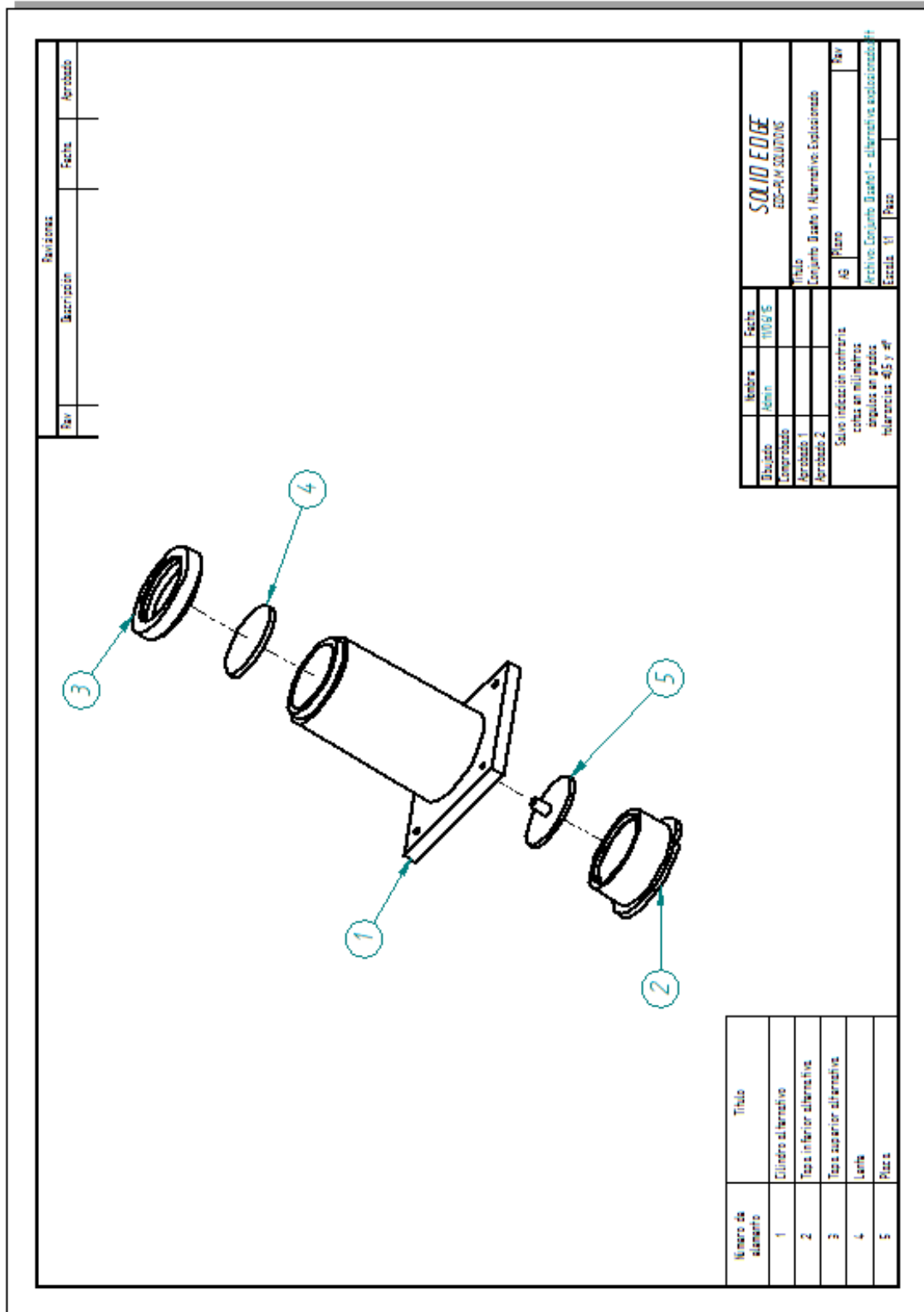
- Tubo de lente Alternativo



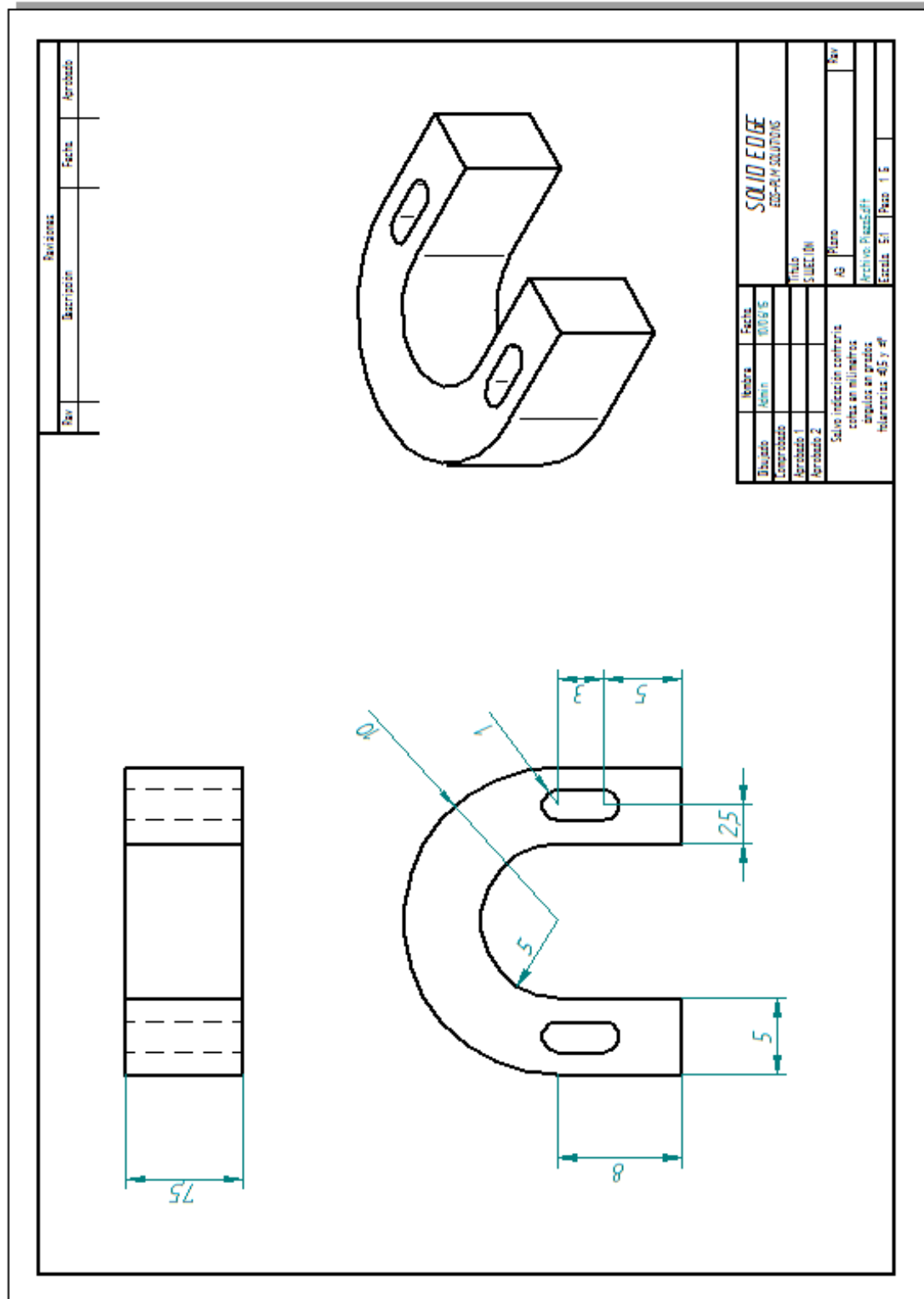
- Tapa Inferior Alternativa



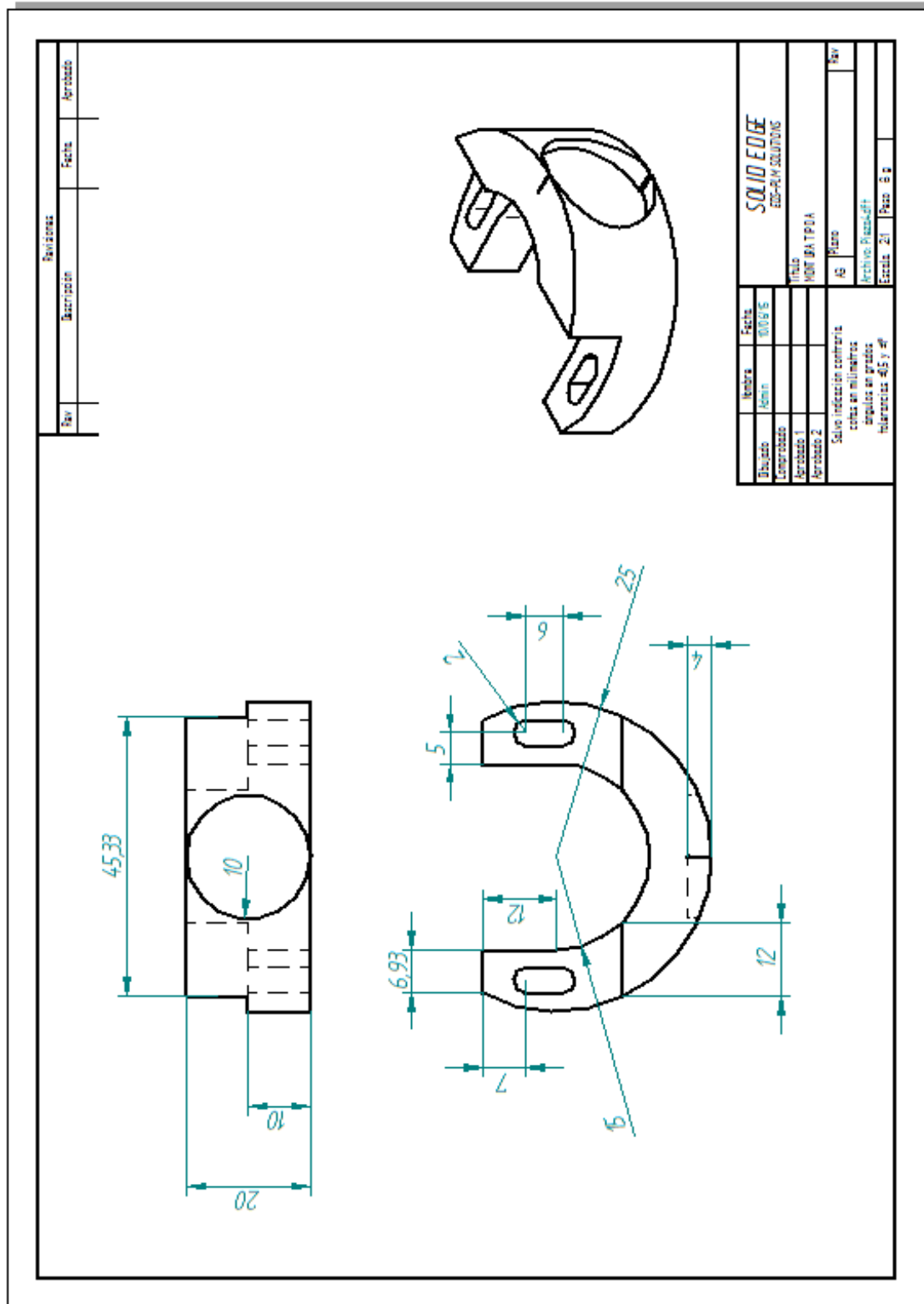
• Diseño 1 Alternativo: vista explosionada



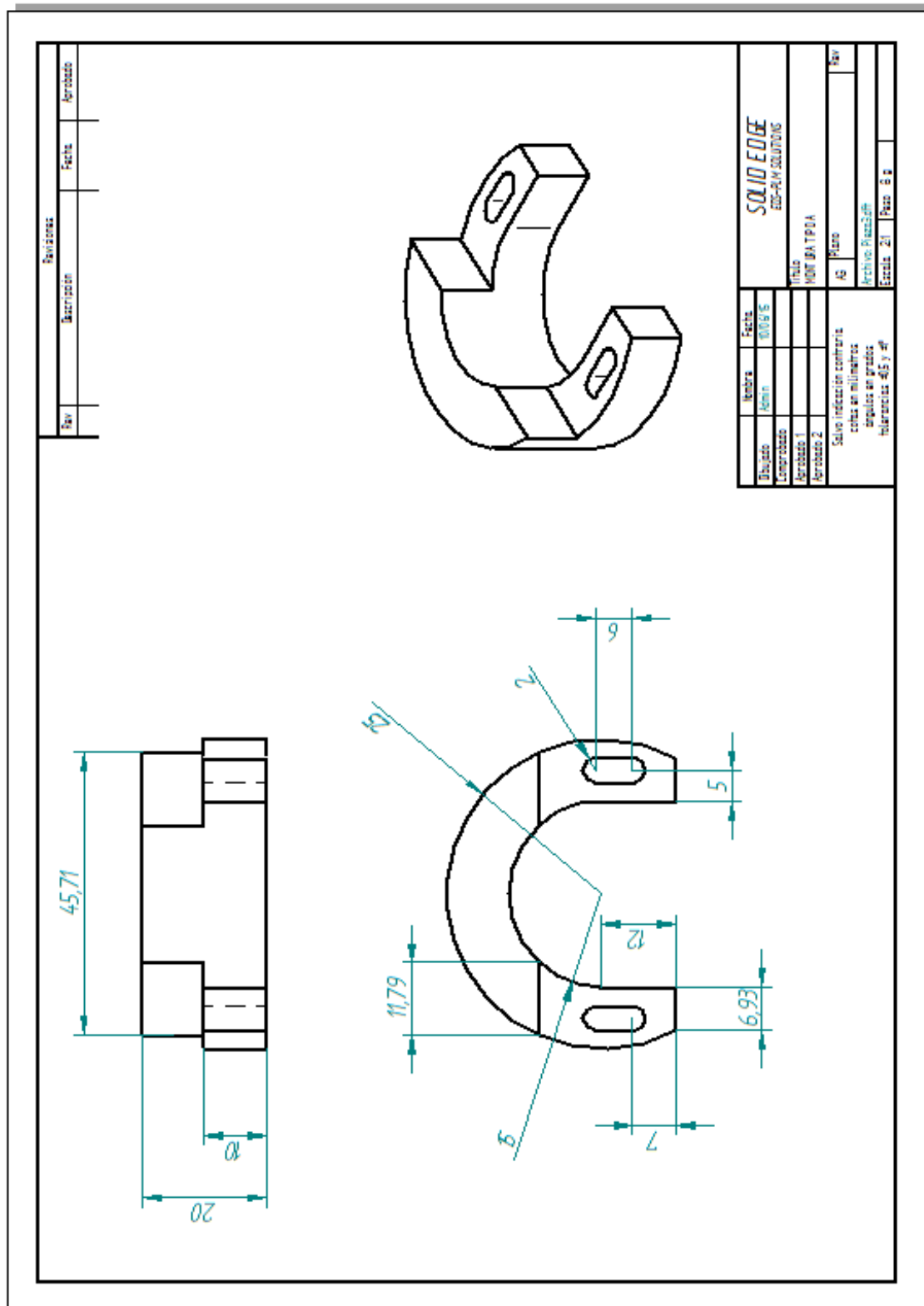
- Sujeción



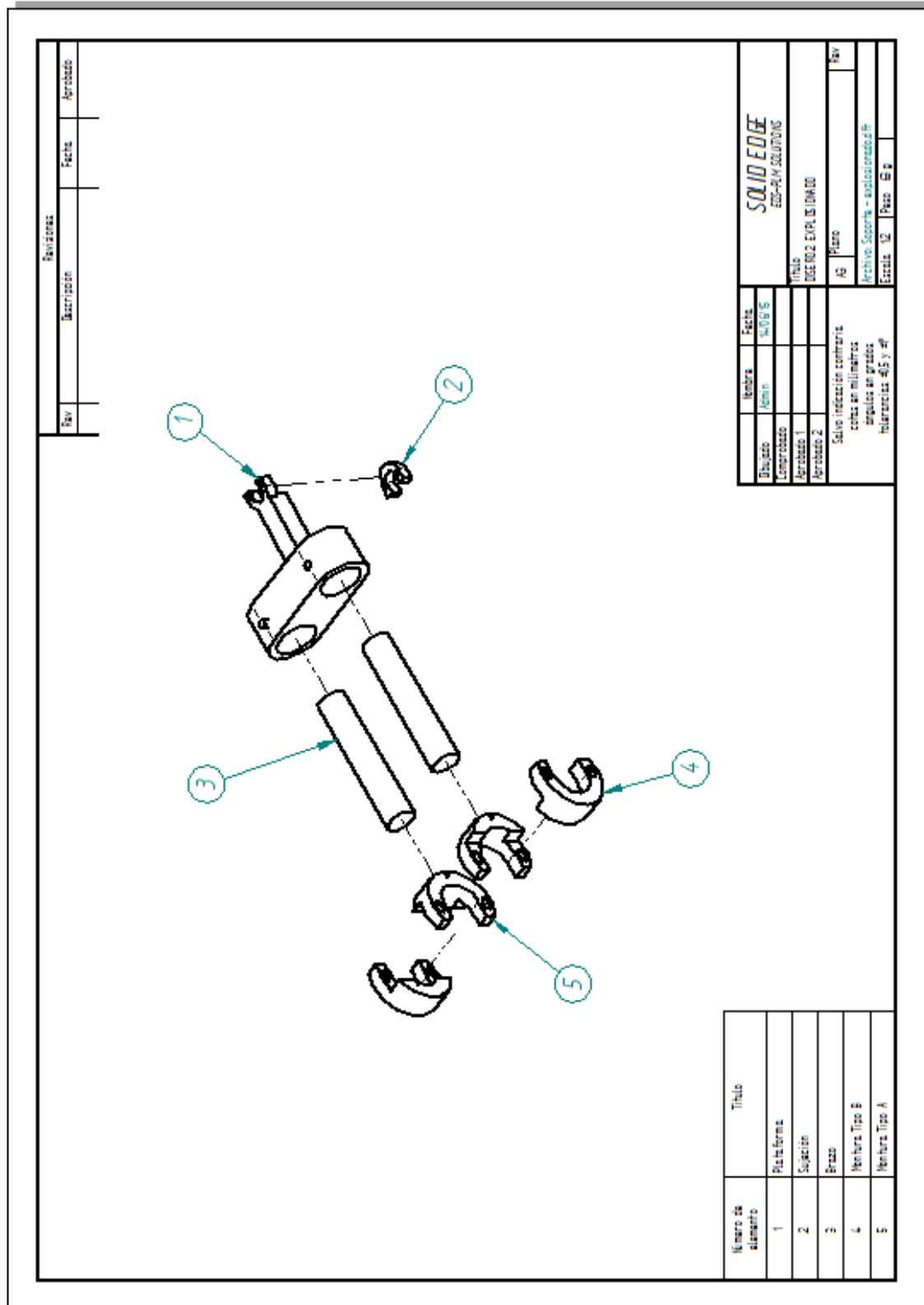
- Montura Tipo A



• Montura Tipo B

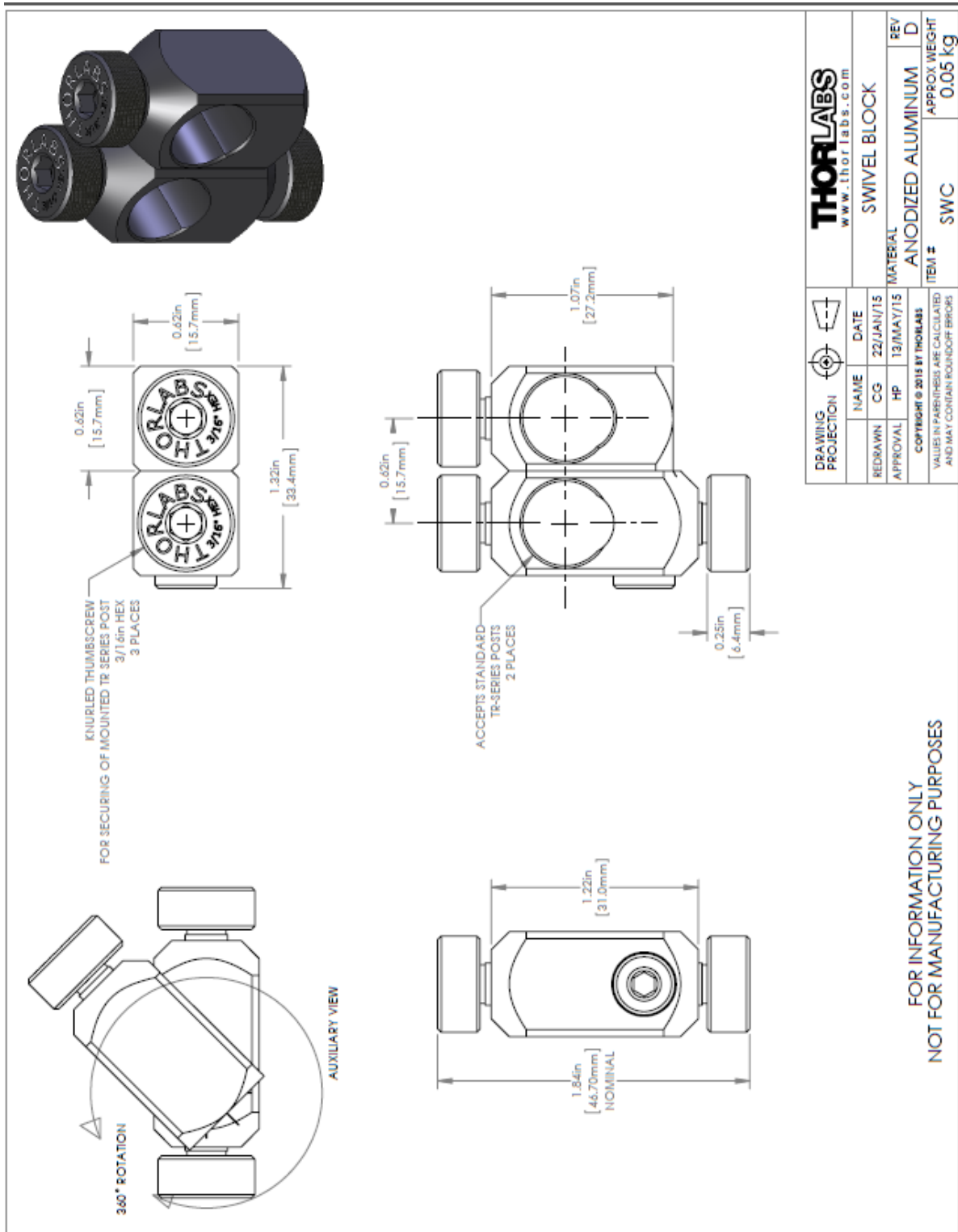


- Diseño 2: vista explosionada

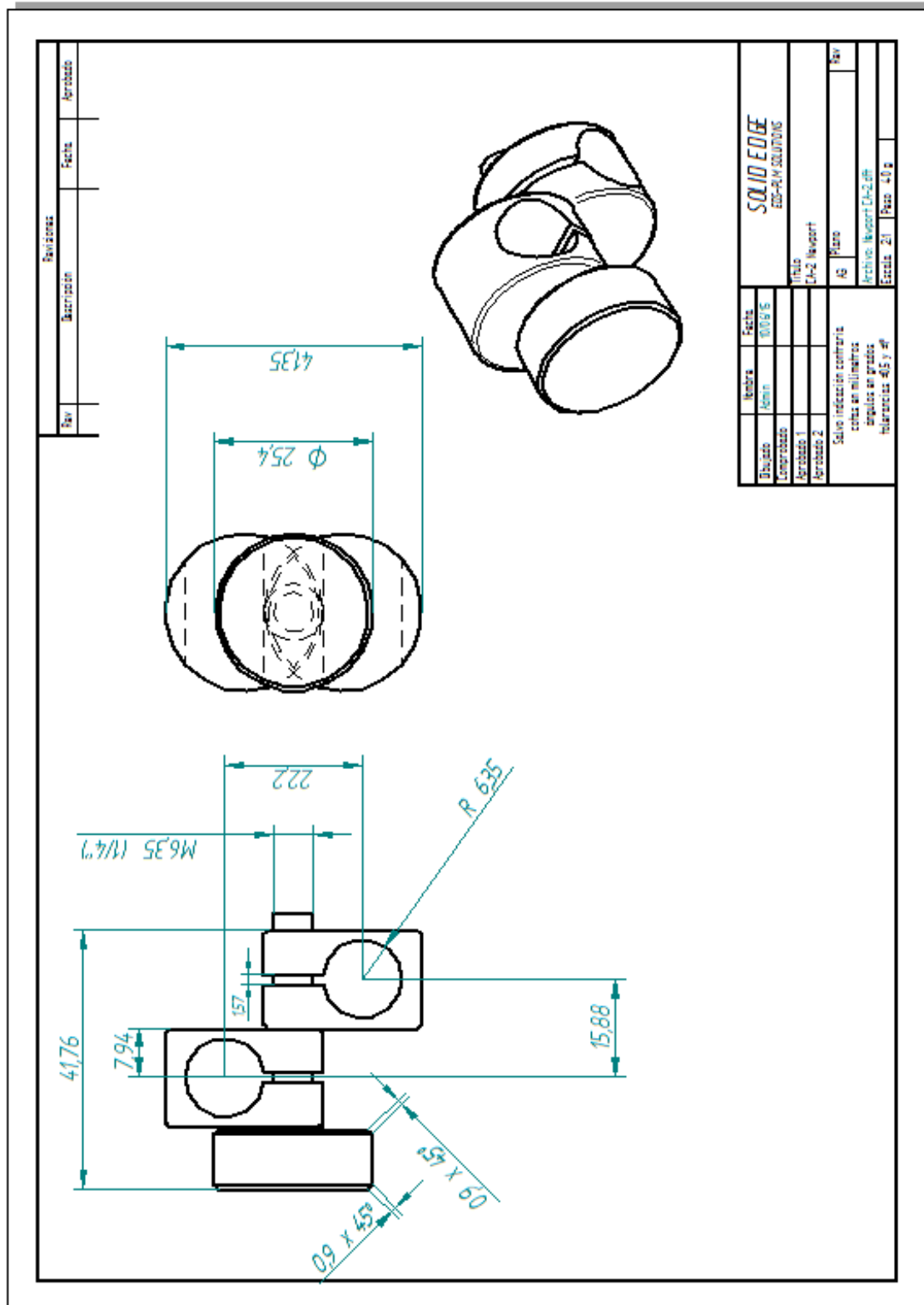


DISEÑO 3

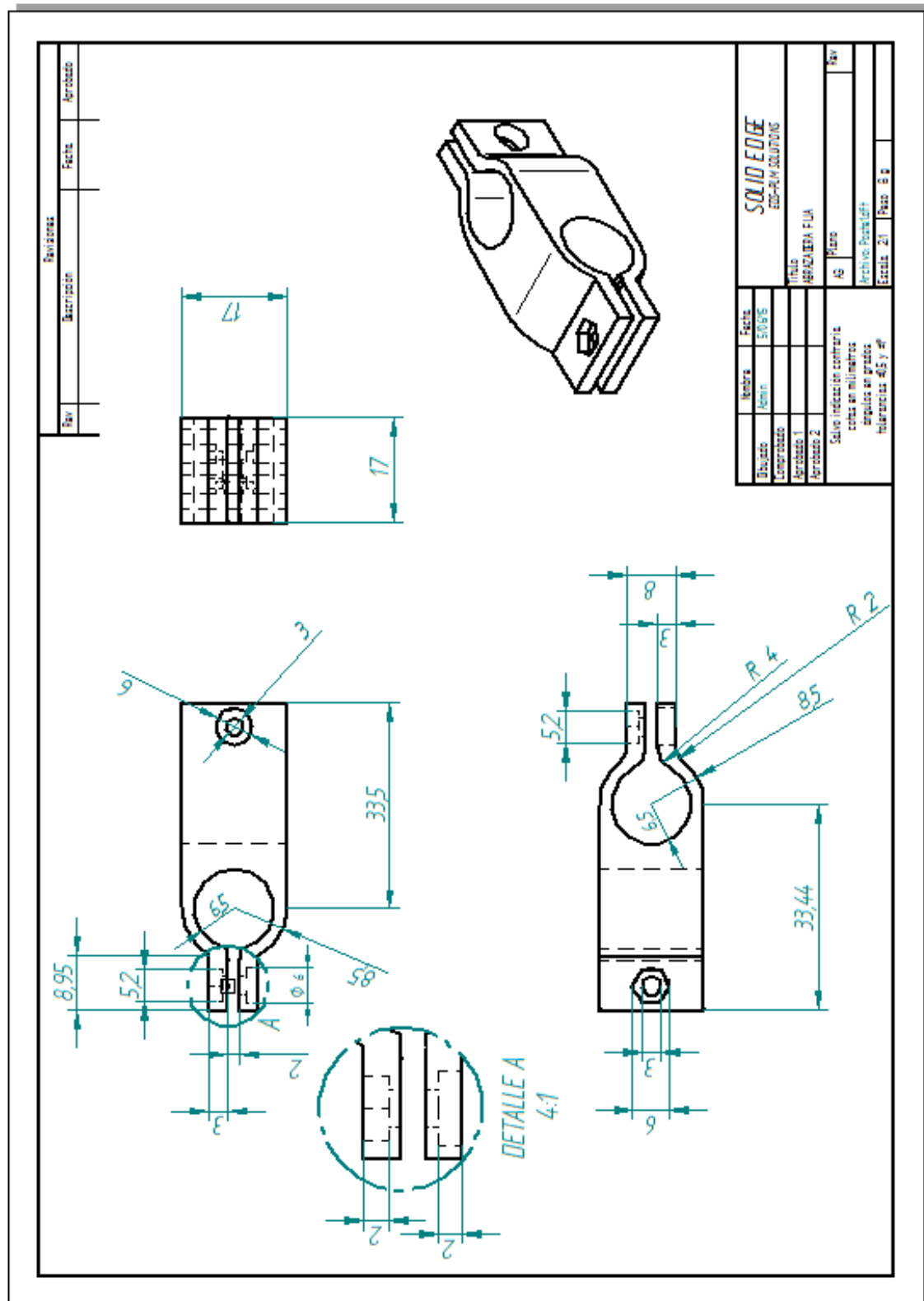
- SWC de Thorlabs**



- CA-2 de Newport



• Abrazadera Fija



- Pasador

